



**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FORMASYON
KONTROLÜ İÇİN YENİ BİR ADAPTİF
GÜRBÜZ KONTROLCÜ TASARIMI**

Kaan CAN

Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI
2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FORMASYON KONTROLÜ İÇİN YENİ BİR
ADAPTİF GÜRBÜZ KONTROLÇÜ TASARIMI**

(A New Adaptive Robust Controller Design for Formation Control of Unmanned
Aerial Vehicles)

DOKTORA TEZİ

Kaan CAN

Danışman: Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI

Erzurum
Eylül, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kaan CAN tarafından hazırlanan “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FORMASYON KONTROLÜ İÇİN YENİ BİR ADAPTİF GÜRBÜZ KONTROLCÜ TASARIMI” başlıklı çalışması 14/09/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kontrol ve Kumanda Sistemleri Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet DURLU <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FDK-2023-12772

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Abdullah Başçi danışmanlığında sunulan “**İnsansız Hava Araçlarının Formasyon Kontrolü İçin Yeni Bir Adaptif Gürbüz Kontrolcü Tasarımı**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	8	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	2	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Kaan CAN	Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI
14.9.2023	14.9.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi nedeni ile Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarımın tüm aşamalarında bilgi birikimini, tecrübelerini, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI'ya çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarım süresince bana vermiş oldukları destekten dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU'ya ve Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU'na teşekkür ederim.

Tezimin saha testleri boyunca beni yalnız bırakmayan ve deneysel çalışmalarım sırasında her türlü destek ve yardımını esirgemeyen Sayın Elektrik-Elektronik Mühendisi Mustafa YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Zorlu doktora sürecim boyunca beni hep destekleyen, bana inanan, çalışmalarım süresince her türlü sabır ve hoşgörü gösteren çok kıymetli Anneme, Babama ve çok sevgili kız kardeşim Asistan Dr. Başak CAN'a çok teşekkür ederim.

Bu tez Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından FDK-2023-12772 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaan CAN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FORMASYON KONTROLÜ İÇİN YENİ BİR ADAPTİF GÜRBÜZ KONTROLCÜ TASARIMI

Kaan CAN

Danışman: Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI

Amaç: Son yıllarda donanım ve yazılım alanındaki gelişmelere paralel olarak, sürü halinde kullanılan İnsansız Hava Araçlarının (İHA) çeşitli alanlarda ve amaçlarda kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır. Sürü halinde bulunan İHA'ların belirli bir görevi ya da oluşumu bir kural üzerinden gerçekleştirerek hareket etmelerini sağlayan yöntem ise formasyon kontrol yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir grup İHA için önceden tanımlı farklı formasyon şekillerini başarıyla oluşturabilmek amacıyla yeni bir adaptif formasyon kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin açık alanda yapılacak saha testleri esnasında İHA'ların duruşunu bozacak yoğun rüzgâr ve parametre belirsizlikleri gibi bozucu etkileri de elimine etmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu tez çalışmasında, dört adet İHA'nın çeşitli formasyon şekillerini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmeleri için Adaptif Gürbüz Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol (AGKFK) algoritması önerilmiştir. Ayrıca, tüm sürünün merkezini temel alan ve her yeni formasyon adımının farklı koordinatlarda gerçekleşmesini sağlayan bir yörünge takip algoritması da AGKTFK algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Son olarak, gerçek zamanlı saha testlerinde formasyon uçuşu sırasında araçlar arasında olası çarpışmaları önlemek amacıyla çarpışmadan kaçınma algoritması da önerilen formasyon kontrol yöntemine dâhil edilmiştir.

Bulgular: Açık alanda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, rüzgârdan ve parametre belirsizliklerinden kaynaklı bozucu etkilere rağmen, İHA'ların formasyon koordinatlarına başarıyla ulaştıktan sonra arzu edilen formasyon şekillerini küçük hatalar ile oluşturdukları görülmüştür. Ayrıca, önerilen adaptasyon kuralının kontrolcü parametrelerini başarıyla hesapladığı ve böylece, formasyon hatasının sifıra yakınsadığı yerde adaptasyon parametrelerinin de sonlu değere ulaştıkları gözlemlenmiştir.

Sonuç: AGKTFK algoritması ile gerçekleştirilen simülasyon ve gerçek zamanlı saha testlerinde İHA'ların bozucu etkilerin varlığında arzu edilen formasyon şekillerini birbirleriyle çarpışmadan küçük hatalar ile oluşturdukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: insansız hava araçları, adaptif kontrol, gürbüz kontrol, formasyon kontrol, konsensüs tabanlı formasyon kontrol.

Eylül 2023, 152 sayfa

ABSTRACT

PH. D. THESIS

A NEW ADAPTIVE ROBUST CONTROLLER DESIGN FOR FORMATION CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Kaan CAN

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah BAŞÇI

Purpose: In parallel with the developments in hardware and software in recent years, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in swarm in various areas and purposes, is increasing day by day. The method that enables UAVs in a swarm to act by performing a certain task or formation according to a rule is called the formation control method. In this thesis, a new adaptive formation control method is proposed in order to successfully create different predefined formation shapes for a group of UAVs. The proposed control method is intended to eliminate disruptive effects such as intense wind and parameter uncertainties that will disrupt the posture of UAVs during the outdoor tests.

Method: In this thesis study, the Adaptive Robust Consensus Based Formation Control (ARC-FC) algorithm is proposed to enable four UAVs to successfully perform various formation shapes. In addition, a trajectory tracking algorithm was used together with the ARC-FC algorithm, which is based on the center of the entire swarm and ensures that each new formation step occurs in different coordinates. Finally, a collision avoidance algorithm was also included in the proposed formation control method in order to prevent possible collisions between vehicles during formation flight in real-time outdoor tests.

Findings: When the studies carried out in the open field were examined, it was seen that, despite the disruptive effects caused by wind and parameter uncertainties, UAVs created the desired formation shapes with minor errors after successfully reaching the formation coordinates. Additionally, it has been observed that the proposed adaptation rule successfully calculates the controller parameters and thus, the adaptation parameters reach finite time steady state values when the formation error converges to zero.

Results: In the simulation and real-time outdoor tests carried out with the ARC-FC algorithm, it was observed that UAVs achieved the desired formation shapes with small errors without colliding with each other in the presence of disruptive effects.

Keywords: unmanned aerial vehicles, adaptive control, robust control, formation control, consensus-based formation control.

September 2023, 152 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
Problemin Tanımı	3
Problemin Çözümü	4
Tez Çalışmasının Amacı	4
KURAMSAL TEMELLER.....	5
İHA'ların Kontrolüne Yönelik Yapılan Çalışmalar	5
İHA'ların Formasyon Kontrolüne Yönelik Yapılan Çalışmalar	7
MATERYAL ve YÖNTEM	15
İnsansız Hava Aracı	15
Dört rotorlu bir İHA'nın modellenmesi	16
Dört rotorlu bir İHA'nın dinamik kontrol yapısı	17
Gerçek Zamanlı Saha Testlerinde Kullanılan Deneysel Ekipmanlar ve İletişim	
Protokolü.....	19
İletişim Protokolleri	20
Soket Programlama	21
Soket türleri.....	21
Graf Teorisi	24
Matris Teorisi.....	27
Lineer Sistem Teorisi	28
Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol.....	28
Gürbüz KTFK yaklaşımı.....	28
Adaptif gürbüz KTFK yaklaşımı	31
ARAŞTIRMA BULGULARI	35

Simülasyon Sonuçları	35
GKTFK yöntemine ait simülasyon sonuçları.....	35
AGKTFK yöntemine ait simülasyon sonuçları.....	57
Gerçek Zamanlı Saha Testlerine Ait Deneysel Sonuçlar	84
GKTFK yöntemine ait deneysel sonuçlar	84
AGKTFK yöntemine ait deneysel sonuçlar	100
SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR	125
KAYNAKÇA	128
ÖZGEÇMİŞ.....	135



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Deneyisel Ekipmanlar ve IP Listesi.....	20
Tablo 2. TCP-UDP Arasındaki Farklılıklar	21



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kazların göç ederken V şeklinde gerçekleştirdiği sürü uçuş (Birds Ecology)	8
Şekil 2. Dört rotorlu bir İHA'nın eksenleri	17
Şekil 3. Sürü İHA uygulamasında kullanılan deneysel ekipmanlar	20
Şekil 4. İstemci – Sunucu Yapısı (https://demirten.gitbooks.io/linux-sistem-programlama/content/sockets/tcp.html)	23
Şekil 5. Dört düğümlü ve dört kenarlı bir yönsüz - bağlı G grafi	24
Şekil 6. Dört düğümlü ve dört kenarlı yönlü-bağlı bir G grafi	25
Şekil 7. İHA'ların simülasyon çalışmalarında GKTFK için gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri ve mesafe bilgileri	35
Şekil 8. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	37
Şekil 9. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları.....	37
Şekil 10. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri	42
Şekil 11. İHA'lar arasında üçgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi	42
Şekil 12. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	44
Şekil 13. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları	44
Şekil 14. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri	49
Şekil 15. İHA'lar arasında eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi.....	49
Şekil 16. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	51
Şekil 17. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları	51
Şekil 18. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri..	56
Şekil 19. İHA'lar arasında hat formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi.....	56

Şekil 20. İHA'ların AGKTFK için simülasyon çalışmalarında gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri.....	57
Şekil 21. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	59
Şekil 22. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları	59
Şekil 23. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri	63
Şekil 24. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi.....	63
Şekil 25. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimleri.....	65
Şekil 26. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	67
Şekil 27. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları	67
Şekil 28. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri	72
Şekil 29. İHA'lar arasında dik üçgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi	72
Şekil 30. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimler.....	74
Şekil 31. İHA'ların kare formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri	76
Şekil 32. İHA'ların kare formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları	76
Şekil 33. İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında sahip oldukları konum ve hız bilgilerindeki değişim	81
Şekil 34. İHA'lar arasında kare formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi.....	81
Şekil 35. İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimler.....	83
Şekil 36. İHA'ların saha testinde gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri ve mesafe bilgileri	84
Şekil 37. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen üçgen formasyonuna ait uçuş görüntüsü	85
Şekil 38. İHA'ların gerçek zamanlı üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri	89

Şekil 39. İHA'ların gerçek zamanlı üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri	89
Şekil 40. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen eşkenar dörtgen formasyon uçuş görüntüsü	90
Şekil 41. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri	94
Şekil 42. İHA'ların gerçek zamanlı eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri.....	94
Şekil 43. İHA'ların saha testlerinde elde edilen hat formasyon uçuş görüntüsü	95
Şekil 44. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen hat formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri	99
Şekil 45. İHA'ların hat formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri ...	99
Şekil 46. İHA'ların gerçek zamanlı saha çalışmalarında gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri.....	100
Şekil 47. İHA'ların saha testlerinde elde edilen kare formasyonuna ait uçuş görüntüsü.....	101
Şekil 48. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe bilgileri.....	104
Şekil 49. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri	104
Şekil 50. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi	108
Şekil 51. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri	108
Şekil 52. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen dik üçgen formasyon uçuş görüntüsü.....	109
Şekil 53. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri.....	113
Şekil 54. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri	113
Şekil 55. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi	117
Şekil 56. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri	117
Şekil 57. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen bumerang formasyonuna ait uçuş görüntüsü	118

Şekil 58. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe bilgileri	121
Şekil 59. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri.....	121
Şekil 60. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi	124
Şekil 61. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri	124



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

η	Türevsel Adaptasyon Kuralı
β	Hataya Bağlı Adaptasyon Kuralı
ρ	Konsensüs Pozisyon Kontrolcü Kazancı
γ	Konsensüs Hız Kontrolcü Kazancı
$\hat{c}_i$	i . adaptasyon parametresi
$\dot{\hat{c}}_i$	i . adaptasyon parametresinin türevi
L	Laplacian Matrisi
A_{ij}	Komşuluk Matrisi
D	Derece Matrisi
μ	Yörünge Takip Algoritmasına ait Konum Kontrolcü Kazancı
φ	Yörünge Takip Algoritmasına ait Hız Kontrolcü Kazancı
k_p	Merkez Yörünge Takip Algoritmasına ait Konum Kontrolcü Kazancı
k_d	Merkez Yörünge Takip Algoritmasına ait Hız Kontrolcü Kazancı
θ	Çarpışmadan Kaçınma Algoritmasına ait Kontrolcü Kazancı
ϑ	Çarpışmadan Kaçınma Algoritmasına ait Üstel Ölçek
r_s	İHA'lar Arası Güvenli Mesafe
r_{ij}	İHA'lar Arası Ölçülen Mesafe
Δ_d	Tüm Sürünün Merkezi Tarafından Ulaşılması Gereken Yeni Konum
Δ_{ij}	Tüm Sürünün x ve y Ekseninde Sahip Olduğu Merkez Referans Konum Mesafesi
Δ_m	Tüm Sürünün x ve y Ekseninde Sahip Olduğu Merkez Konumlarının Ortalaması
u_{ai}	Önerilen Adaptif Formasyon Kontrol İşareti
u_{ti}	Yörünge Kontrol İşareti
u_{ij}^r	Çarpışmadan Kaçınma Algoritmasına ait Kontrol İşareti
u_T	Toplam Kontrolcü İşareti
f_i	i . Rotor Tarafından Oluşturulan Kaldırma Kuvveti
w_i	Rotor Açısız Hızı
B	Gövde Eksen
b	İtme Faktörü

d	Sürüklenme Faktörü
G	Jiroskopik Tork
g	Yerçekimi İvmesi
I	Atalet Eksen
K	Konsensüs Kontrolcü Kazancı
m	Quadrotorun Kütlesi
$\odot$	Dakikada Meydana Gelen Artık Devirler
n	Kontrol Edilecek Sistemin Derecesi
P	Simetrik Matris
Γ	Kontrolcü Matrisi
$R: I \rightarrow B$	Rotasyon Matrisi
$sk()$	Skew- Simetrik Matrisi
T	Rotor Kuvvetleri Tarafından Oluşan Toplam İtme Kuvveti
v	Doğrusal Hız
δ_{ij}	Referans Formasyon Mesafesi
ς	Eksenel Duruş Açıları
ξ	Konum Parametresi
τ	Tork İfadesi
Ω	Açısal Hız
AGKTFK	Adaptif Gürbüz Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol
AKKK	Adaptif Kayan Kipli Kontrolcü
GAKKK	Gürbüz Adaptif Kayan Kipli Kontrolcü
GKTFK	Gürbüz Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol
İHA	İnsansız Hava Aracı
KKK	Kayan Kipli Kontrolcü
KTFK	Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol
LME	Lineer Matris Eşitsizliği
L-T	Lider – Takipçi
LKD	Lineer Kuadratik Düzenleyici

GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA) günümüzde düşük maliyetli olarak üretilebilmektedirler. Gelişen uçuş kontrol kartları, yazılımlar, mini bilgisayarlar vb. temel ekipmanlar ile bir İHA inşa etmek oldukça kolay hale gelmiştir. Bu nedenle İHA'lar sivil, askeri ve akademik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sivil alanlara örnek olarak sinema, reklam ve televizyon sektöründe; askeri alanlara örnek olarak keşif, gözetleme, haritalama ve istihbaratta; akademi de ise özellikle uçuş kontrol algoritmalarının pratik uygulamalarında, görüntü işlemede ve sürü uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Tüm bu uygulama alanlarından en dikkat çeken ve karmaşık olanı ise İHA'ların sürü halinde gerçekleştirdikleri uçuş kontrolü olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sürü İHA'ların pratik uygulamaları, sahip olduğu birçok değişken nedeniyle araştırılması ve üstesinden gelinmesi gereken zorluklar içermektedir.

Sürü İHA uygulaması genelde; bir grup İHA'nın kendi aralarında bilgi paylaşarak sağladıkları konum kontrolünden ziyade, bir kullanıcı tarafından her bir İHA'ya üç boyutlu uzayda bir koordinat atanarak gerçekleştirilen bir uygulamadır. Bu nedenle, gerçekleştirilmek istenen şekil ya da görev uygulamaları sınırlı olmaktadır. Ayrıca, sürü uçuşu sırasında İHA'ların kendi aralarında bilgi paylaşımı gerçekleştirmemeleri nedeniyle görev başarımı için her bir İHA'nın tek tek kontrol edilmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, sürü İHA uygulamalarının özel bir durumu olan formasyon kontrolünde ise, sürü içerisinde bulunan İHA'ların belirli bir şekli ya da görevi yerine getirebilmeleri için kendi aralarında bilgi (hız ya da konum) paylaşımları gerekmektedir.

Formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için literatürde çeşitli kontrol yöntemleri türetilmiştir (Can & Başçi, 2022; Guzey *et al.*, 2019; Rinaldi *et al.*, 2013; Thien *et al.*, 2018). Literatürde bilinen ve sıkça kullanılan formasyon kontrol yöntemleri ise sırasıyla; lider-takipçi (Mahmood & Kim, 2015; Notarstefano *et al.*, 2011; Can & Başçi 2021), merkezi olmayan (Lee & Chong, 2009; Yang *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2022; Choi *et al.*, 2020), dağıtık (Zhou *et al.* 2019), olay tetiklemeli (Li *et al.*, 2019) ve konsensüs tabanlı formasyon kontrol (KTFK) (Can & Başçi, 2022; Zhang *et al.* 2018; Yan *et al.*, 2019; Pal & Naskar, 2021) yöntemleridir.

Bu yöntemlerden ilki olan Lider-Takipçi (L-T) formasyon kontrolü yaklaşımında, lider konumunda bulunan bir İHA'nın konum bilgisi takipçi konumunda bulunan diğer İHA'lar

tarafından algılanarak sürünün istenilen formasyonu gerçekleştirmesi sağlanmaktadır (Rafifandi *et al.*, 2019). Bu sayede, lider ile takipçiler arasında sürekli bir iletişim gerçekleştirilerek bir bilgi paylaşımı yapılmaktadır. Ancak, İHA'ların sürü uçuşunda lider konumunda bulunan İHA'nın vurulma, arıza, bilgi iletişimde kopukluk vb. durumlar ile karşılaşması halinde takipçi konumundaki İHA'lara formasyon bilgisi iletilmeyeceğinden dolayı formasyon bozulacaktır. Ayrıca, literatürde bu yöntem daha çok merkezi yapı olarak bilinmektedir (Kocer *et al.*, 2018). Ancak, doğada birçok yapı merkezi olmayan bir düzen içerisindedir (Qian & Xi, 2018). Örneğin, büyük baş hayvan sürüleri, kaz sürüleri ve balık sürüleri lidersiz merkezi olmayan düzen içerisindedirler (Lee *et al.*, 2019; Jin *et al.*, 2019). Bu tür sürülerde, hayvanlar etrafta bulunan tehlike ya da değişimleri merkezdeki bir liderden değil, hemen yanında bulunan sürü üyesinin durumundaki değişimden algılamaktadır. Böylece, bütün sürü tek bir lider tarafından gelecek sinyali beklemek yerine, yakınında bulunan sürü üyesinden gelen bilgileri yorumlar ve sürü davranışı merkezi olmayan bir yapıda değişir. Ayrıca merkezi olmayan formasyon yapıları olan dağınık ve merkeziyetsiz formasyon kontrol yöntemleri sadece sürü içerisinde bulunan her bir elemanın kendi konumunu doğrulaması üzerinedir. Bu yüzden, İHA'lar için hem konum doğrulaması sağlayacak hem de tüm sürü üyelerinin ortak bir amacı gerçekleştirebilmelerini mümkün kılacak bir formasyon kontrol yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

KTFK algoritması temelde; bir sürü ya da oluşum içerisinde bulunan bir İHA grubunun belirli bir konu üzerinde fikir birliği sağlamasıdır (Can & Başçi, 2022). Sürü halinde bulunan İHA'lar arzu edilen formasyonu gerçekleştirirken, hem bilgi paylaşımı aracılığıyla konumlarını doğrulamakta hem de verilen bir görev üzerinde fikir birliği sağlamaktadırlar. Literatürde tek integratör olarak tanımlanan bir grup İHA'nın konumları üzerine KTFK uygulaması gerçekleştirilmiştir (Olfati-Saber *et al.*, 2007; Yan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016; Jing *et al.*, 2017; Lv *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Kolaric *et al.*, 2018). Ancak yayımlanan bu çalışmalar incelendiğinde, çoğunlukla İHA'ların tek integratör durumları üzerinden sadece temel konsensüs algoritmasını ($\varepsilon = \sum_{i=1}^N a_{ij}(x_i - x_j)$) simülasyon ortamında doğrulamak amacıyla gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. İHA'ların sahip olduğu karmaşık yapıları ve zor kontrol edilebilir dinamikleri nedeniyle önerilen temel KTFK'nün gerçek zamanlı formasyon uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, literatürde sunulan bazı çalışmalarda ise temel KTFK yapısının geliştirilerek gürbüz bir yapıya kavuşturulduğu görülmüştür (Trejo *et al.*, 2021; Can & Başçi, 2022; Restrepo *et al.*, 2023). Her ne kadar KTFK algoritmasına gürbüzlük özelliği kazandırılmış olsa da, tasarlanan gürbüz kontrol algoritması incelendiğinde tüm sistemin doğrusal durum uzay modeli üzerinden tasarımının

yapıldığı ve bir K parametresi ($\varepsilon = K \sum_{i=1}^N a_{ij}(x_i - x_j)$) ile tüm sürünün bir durum üzerinde fikir birliği sağladığı görülmektedir (Wang *et al.*, 2017; Zhang & Li, 2017; Can & Başçı, 2022). Ayrıca, elde edilen K parametresinin tüm formasyon uçuşu boyunca sabit değerde olduğu, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda karşılaşılan çeşitli bozucu etkilere karşı (rüzgar, ağırlık değişimi vb.) elde edilen K parametresinin tek başına yetersiz kalacağı aşikardır. Bu sebeple çeşitli akademik çalışmalarda, KTFK yapısı bir adım daha öteye götürülerek, karşılaşılan bozucu etkileri kompanze edebilmesi için adaptif bir yapıya kavuşturulmuştur (Lv *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2020; He *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021; He & Dong, 2022). Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, önerilen konsensüs algoritmalarının sadece sistemin konumu üzerinden fikir birliği sağlanmaya yönelik olduğu ve yapılan çalışmaların ise simülasyon ortamında gerçekleştirildikleri görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, bir grup İHA'nın konum ve lineer hız bilgileri üzerinden fikir birliği sağlanarak arzu edilen çeşitli formasyon şekillerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, temel KTFK algoritmasına gürbüzlük özelliği kazandırılmış ve tüm sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklılığı artırılmıştır. Ayrıca, tez kapsamında açık alanda yapılan saha testleri sırasında havanın rüzgârlı olması nedeni ile, gürbüz KTFK algoritmasına adaptif bir yapı kazandırılarak, meydana gelen parametre değişimlerinin kompanze edilmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte, İHA'ların lineer hızları üzerinden sağlanan fikir birliğinin çeşitli formasyon şekillerini gerçekleştirirken, her bir formasyonun yeni bir koordinat noktasında (x ve y ekseninde) gerçekleştirilmesi sağlanmış ve böylece önerilen adaptif gürbüz KTFK (AGKTFK) algoritmasının etkinliği daha iyi gözlemlenmiştir.

Problemin Tanımı

Bu tezin amacı dört adet açık kaynak kodlu İHA'dan oluşan bir sürünün belirli formasyon düzenlerini yeni bir AGKTFK ile hem simülasyon hem de gerçek zamanlı saha testlerinde etkin olarak gerçekleştirmektir. Gürbüz konsensüs tabanlı formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için kontrolcünün yapısında bulunan K kazancının sürünün formasyon uçuşu sırasında gürbüz bir davranış sergilemesi sağlanmalıdır. Bu nedenle, K kazancı deneme-yanılma yöntemi yerine lineer matris çözümleri dikkate alınarak elde edilmeli ve böylece sistemin gürbüzlüğü sağlanmalıdır. Ayrıca, önerilen yeni AGKTFK yönteminin sürünün özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda karşılaştığı hem iç hem de dış ortamlardan (rüzgâr, konum hataları, batarya seviyesi vb.) kaynaklı parametre değişimlerine karşı kontrolcüyü adapte edecek uygun katsayıları yeniden hesaplamalı ve sürünün arzu edilen formasyon düzenini minimum hata ile sağlamalıdır.

Problemin Çözümü

Bu tez çalışmasında İHA'ların formasyon kontrolü için yeni bir AGKTFK yaklaşımı önerilmiş ve önerilen kontrolcünün performansı hem simülasyon ortamında hem de gerçek zamanlı saha testlerinde test edilmiştir. İlk olarak, sürünün formasyon uçuşu sırasında gürbüz kontrol gerçekleştirmek için KTFK tercih edilmiş ve bu kontrolcünün sahip olduğu K kazancı Lineer Matris Eşitsizliği (LME) kullanılarak elde edilmiştir. Sürünün arzu edilen formasyonları gürbüz olarak gerçekleştirmesi için elde edilen K kazancı, sistemin lineer modeli gözetilerek hesaplandığından sistemin tüm dinamikleri göz önünde bulundurulamamıştır. Bu nedenle, önerilen gürbüz KTFK (GKTFK) yöntemi adaptif hale getirilerek, kontrolcünün gürbüzlüğü artırılmış ve ayrıca parametre değişimlerinden kaynaklı hataları elimine etmesi de sağlanmıştır.

Tez Çalışmasının Amacı

- a) Konsensüs tabanlı formasyon kontrol yöntemi kullanılarak İHA'ların lineer hızları üzerinde sağlayacakları fikir birliği ile arzu edilen formasyon şekillerini gerçekleştirmelerini sağlamak.
- b) Gürbüz formasyon kontrolü gerçekleştirmek için, konsensüs tabanlı kontrolcünün sahip olduğu K parametresini deneme-yanılma yöntemi yerine, LME yöntemini kullanarak belirlemek.
- c) GKTFK yöntemi elde edilirken, sistemin tüm dinamiklerinin göz önünde bulundurulmamasından kaynaklı hataları gidermek için önerilen GKTFK yöntemini adaptif hale getirmek.
- d) Elde edilen AGKTFK yönteminin etkinliğini göstermek adına ilgili kontrol yöntemini hem simülasyon hem de gerçek zamanlı saha testlerinde değişen koordinatlar üzerinden test etmek.

KURAMSAL TEMELLER

İHA'ların Kontrolüne Yönelik Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, dört rotorlu bir İHA olan quadrotor ile formasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, ilk önce literatürde İHA ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir.

Liu *et al.*, (2016), Quanser marka Qball-X4 quadrotorunun yörünge takibini gerçekleştirmek için PID ve Lineer Kuadratik Düzenleyici (LKD) kontrol yöntemlerini kullanmışlardır. İlk olarak, simülasyon ortamında quadrotorun dinamik denklemleri kullanılarak kontrolcülerin uygun parametre değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen kontrolcü parametreleri gerçek zamanlı olarak quadrotorun yörünge takibinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde LKD kontrolcüsün referans çember yörüngeyi daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir.

Başçi (2016), dört rotorlu bir İHA'nın gerçek zamanlı olarak yörünge takibini gerçekleştirmiştir. Altı serbestlik derecesine sahip olan İHA'yı, Euler açılarının kontrolünün gerçekleştirildiği iç döngü ve ötelemeli hareketin gerçekleştirildiği dış döngü olarak iki ayrı alt sistem olarak tasarlamış ve quadrotorun yörünge takibini gerçekleştirmek için rota referanslar oluşturmuştur. Yapılan çalışmada kontrolcü olarak kesir dereceli PI kontrolcüsü kullanılmış ve önerilen kontrol yöntemi klasik PI kontrolcü ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar kesir dereceli PI kontrolcünün daha iyi bir yörünge takip performansı gerçekleştirdiğini göstermiştir.

Garcia *et al.*, (2012), bir quadrotor için gürbüz PID kontrol yöntemi önermişlerdir. Önerilen PID kontrolcüsünün gürbüzlüğü ağırlıklı tamamlayıcı hassasiyet fonksiyonunun H_∞ normu kullanılarak sağlanmıştır. Böylece lineer ve sabit parametrelili bir kontrol yöntemi olan PID kontrolcüsünün, sistem dinamiklerinde meydana gelen değişimleri elimine edebilmesi için H_∞ kontrolcü ile melezlenmiştir. Önerilen kontrol yöntemi ile sistem dinamiklerinde meydana gelen değişimlerin elimine edildiği görülmüştür.

Raffo *et al.*, (2011), bir quadrotor için doğrusal olmayan bir kontrol yöntemi olan H_∞ kontrol yöntemi önermişlerdir. Quadrotorun eksik girdili bir sistem olması ve kontrolünün oldukça karmaşık olmasından dolayı yapılan çalışmada gürbüz bir kontrolcünün etkisi gösterilmek istenmiştir. Ayrıca, quadrotorun kontrolünü sağlamak amacıyla, dış döngü ve iç döngü olmak üzere sistem iki alt sisteme ayrılmıştır. Böylece, yörünge takibini

gerçekleştirmek için quadrotorun ihtiyacı olan duruş açıları dış döngü tarafından belirlenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında sistemin parametre belirsizlikleri ve aerodinamik gürültüler de dikkate alınmış ve önerilen kontrolcünün etkinliği gösterilmiştir.

Yang *et al.*, (2013), bir quadrotorun kontrolünü gerçekleştirmek için kendinden uyarlamalı adaptif kutup yerleştirme yöntemini önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi, PID kontrolcüsünün sahip olduğu sabit parametreleri, sistemin dinamiklerinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak uyarlamış ve quadrotorun stabil uçuşunu gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçları önerilen kontrol yönteminin etkinliğini ve gürbüzlüğünü göstermiştir.

Amoozgar *et al.*, (2012), quadrotorun aktüatörlerinde meydana gelen hataları tolere etmek için adaptif PID kontrolcü önermişlerdir. Bulanık mantık yöntemi ile PID kontrolcüsünün parametreleri uyarlanmış ve sistemde meydana gelen hatalar kısa sürede elimine edilmiştir. Yapılan gerçek zamanlı çalışmada, önerilen kontrol yönteminin klasik PID kontrolcüye oranla hem tek motor hem de tüm motorlarda meydana gelen hataları daha iyi elimine ettiği görülmüştür.

Can ve Başçi (2016), quadrotorun yörünge takibini gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmek için geri adımlamalı kontrolcü tasarlamışlardır. İlk olarak, quadrotorun dinamik denklemleri türetilmiş ve önerilen kontrol yöntemi, quadrotorun dinamik denklemleri gözetilerek tasarlanmıştır. Ayrıca, kontrolcünün kararlılığı Lyapunov kararlılık analizi ile ispatlanmıştır. Yapılan gerçek zamanlı uygulamalar önerilen kontrolcünün etkinliğini göstermiştir.

Can (2017), quadrotorun gerçek zamanlı kontrolünü gerçekleştirmek için doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinden kayan kipli kontrolcü (KKK) yöntemini kullanmış ve ilgili kontrolcüye PI kontrolcü ile kıyaslamıştır. İlk olarak, karmaşık bir yapıya sahip olan quadrotoru dış ve iç döngüler olmak üzere iki ayrı alt sisteme ayırmış ve bu iki yapının kaskad olarak bağıntısını göstermiştir. Daha sonra, yörünge kontrolünün gerçekleştirildiği dış döngü için KKK tasarlanmıştır. Önerilen kontrol yöntemi çeşitli referanslar altında iç ortam koşullarında denenmiş ve elde edilen sonuçlar KKK'nün PI kontrolcüye oranla daha iyi bir yörünge takibi gerçekleştirdiğini göstermiştir.

Sumantri *et al.* (2016), bir quadrotor için sonlu kareler yöntemine dayalı yeni bir kontrol yapısı önermişlerdir. İlk olarak, Newton-Euler yöntemini kullanarak altı serbestlik derecesine sahip olan quadrotorun dinamik denklemlerini elde etmişlerdir. Daha sonra, sonlu kareler yöntemini kullanarak quadrotorun ötelemeli hareketi için ürettiği kontrol işaretinin artık kontrol girdisini çözmüşlerdir. Ayrıca, gürbüz bir kontrol sağlamak adına, KKK yöntemini de kullanmışlardır. Önerilen kontrol yönteminin global kararlılığını göstermek için

Lyapunov kararlılık analizini kullanmışlardır. Son olarak, tasarlanan kontrol yönteminin etkinliğini göstermek için quadrotor kuvvetli rüzgâr altında test edilmiş ve önerilen kontrol yöntemi PD ve PID gibi kontrolcülerle kıyaslanmıştır.

Li *et al.* (2017), quadrotorun yörünge kontrolünü gerçekleştirmek için adaptif gürbüz bir kontrol yöntemi önermişlerdir. İlk olarak, quadrotorun matematiksel modeli incelenmiş ve sistem dinamiklerinin sahip olduğu parametre belirsizlikleri de hesaba katılarak sistemin modeli türetilmiştir. Devamında, önerilen yöntem quadrotorun sahip olduğu parametre belirsizlikleri ve harici gürültüler altında test edilmiş ve kontrolcünün yörünge takip performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, önerilen kontrol yönteminin yörünge takibi sırasında meydana gelen parametre belirsizliklerine karşı gürbüz bir davranış gösterdiği ve quadrotoru yörüngede tutabildiği görülmüştür.

Nguyen & Hong (2019), bir quadrotorun sahip olduğu sistem belirsizlikleri ve aktüatör hatalarının kontrolünü gerçekleştirmek için gürbüz adaptif KKK (GAKKK) yöntemi önermişlerdir. Kullanılan GAKKK yöntemi, normal adaptif KKK (AKKK) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. GAKKK'nün adaptasyon kuralı yapay sinir ağları kullanılarak türetilmiştir. Ayrıca, önerilen kontrolcünün kararlılığı Lyapunov kararlılık analizi ile ispatlanmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde GAKKK'nün çeşitli hata senaryoları altında AKKK'ye kıyasla daha hızlı hata toleransı gerçekleştirdiği ve daha iyi referans takibi sağladığı görülmüştür.

İHA'ların Formasyon Kontrolüne Yönelik Yapılan Çalışmalar

İHA'ların sağladığı faydayı artırmak ve insan gücü gerektiren alanlarda bu tür sistemlerin verimini ve etkinliğini artırmak için son yıllarda farklı yaklaşımlar önerilmiştir (Zulu & John, 2014; Milburn, 2018). İHA'ların toplu hareketini sağlamak için formasyon kontrolü önerilen yaklaşımlardan biridir (Guzey *et al.*, 2019; Rinaldi *et al.*, 2013).

Formasyon kontrolü, toplu hareket edebilen sistemlerin, canlıların ya da yapıların belli bir fayda veya yarar sağlamak için oluşturdukları belirli bir geometrik yapı düzenidir. Örnek olarak, Şekil 1'de bir kaz sürüsünün V düzeninde gerçekleştirdiği formasyon kontrolü görülmektedir. Doğada sürü olarak formasyon kontrolünü en mükemmel şekilde icra eden canlıların başında gelen kazlar, oluşturdukları V düzeni sayesinde her bir kazın kanat çırpmasından oluşan hava akımını kullanırlar. Bu sayede, hem daha az enerji harcarlar hem de daha uzun menzilde göç edebilmektedirler. Ayrıca, lider konumunda bulunan kaz, formasyonun en önünde olduğu için, formasyonun getirdiği avantajlardan faydalanamamaktadır. Bu nedenle, lider konumunda bulunan kaz yorulduğunda yerine yakınında bulunan kaz geçerek sürü düzeni korunmuş olunur.



Şekil 1. Kazların göç ederken V şeklinde gerçekleştirdiği sürü uçuş (Birds Ecology)

Şekil 1’de verilen kaz sürüsü örneğinden hareketle araştırmacılar, günümüzde yazılım ve donanım ekipmanlarının yardımıyla çeşitli alanlarda kullanılabilecek şekilde farklı kontrol yöntemleri geliştirmişlerdir. Aşağıda literatürde gerçekleştirilmiş bazı formasyon kontrol yöntemlerine ait çalışmalar sunulmuştur.

Köksal *et al.* (2015), çoklu quadrotor sisteminin gerçek zamanlı formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için merkezi olmayan adaptif formasyon kontrol yöntemi önermişlerdir. Quadrotorun sahip olduğu parametre belirsizlikleri göz önünde bulundurularak tasarlanan kontrol yöntemi lider-takipçi formasyon kontrolü mantığına dayanılarak tasarlanmıştır. Önerilen kontrol yöntemi iki seviye yapısı gözetilerek tasarlanmıştır. Bunlardan ilki yüksek seviye olan bir dağıtık kontrol yapısının olduğu kısımdır. Bu kısım quadrotorun kinematik formasyon kontrol problemi için tasarlanmış olup lider-takipçi yapısının düzeni kontrol edilmiştir. Daha sonraki yapı olan düşük seviyede ise, her bir quadrotorun kendi iç belirsizliklerini ve duruşunu kontrol etmek için adaptif LKD kontrolcü tasarlanmıştır. Ayrıca, parametre belirsizleri ile başa çıkmak adına parametre tahminini sağlamak için sonlu-kareler yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon ve gerçek zamanlı uygulamalar, çeşitli senaryolar altında denenmiş ve quadrotorların formasyon kontrolünü ve kendi duruşlarını minimum hatayla gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Rice *et al.* (2016) bir grup quadrotor için yakın formasyon kontrolü gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada, lider-takipçi formasyon kontrolü baz alınarak tasarlanmış ve quadrotorların çeşitli senaryolar altında formasyon kontrolünü gerçekleştirmeleri istenmiştir. İlk olarak, yakın formasyon kontrolünü sağlamak amacıyla doğrusal olamayan adaptif kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen kontrol yöntemiyle, quadrotorların arasında mevcut olan

mesafeyi korumaları ve lider konumunda bulunan quadrotorun herhangi bir ani manevra durumunda takipçi konumunda bulunan quadrotorun da kısa sürede düzeni sağlaması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmalar, yakın formasyon kontrolü için önerilen kontrol yönteminin gerçek zamanlı uygulamalarda simülasyon ortamından daha düşük performans gösterdiği ancak takipçi konumunda olan quadrotorun düzeni sağlayabildiğini göstermiştir.

Dierks & Jagannathan (2009), küresel koordinat sistemine dayalı çoklu İHA sisteminde lider-takipçi formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için yeni bir yapı geliştirmişlerdir. Takipçi İHA için kontrolün amacı, yardımcı bir hız kontrolü aracılığıyla, lider İHA'yı istenilen mesafede takip etmesi, geliş açısını ayarlaması ve bir hata anında takipçi İHA'nın konacağı yere geri gelmesidir. Daha sonra, dinamik sistem için aerodinamik sürtünme gibi modellenemeyen dinamikleri dahi içeren İHA'nın tüm dinamiklerini öğrenmek için özgün bir yapay sinir ağı tabanlı kontrol yasası önerilmiştir. Buna ek olarak, lider ve takipçi İHA arasındaki dinamik hatalar göz önünde bulundurularak tüm formasyonun kararlılığı Lyapunov teoremi kullanılarak ispatlanmıştır. Nümerik sonuçların teorik varsayımları doğruladığı görülmüştür.

Chamseddine *et al.* (2012), formasyon uçuşu sırasında quadrotorun hata tolerans kontrolü için bir yaklaşım önermişlerdir. İlgili çalışmada zarar görmüş quadrotorun sağlam quadrotorları takip etmeyi devam ettirmesi için tüm formasyonun referans rotası yeniden planlanmış ve hata toleransı başarımlı gerçekleştirilmiştir. Böylece, sanal yapı formasyon iskeleti benimsenmiş ve uygulanan kontrol girişleri ile referans yörüngeler arasındaki ilişkiyi bulmak için diferansiyel düzlük yöntemi uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları önerilen yaklaşımın etkinliğini göstermektedir.

Ailon & Arogeti (2013), düzen içerisinde uçan bir çoklu quadrotor sistemi için bir kontrolcü önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi, çoklu quadrotor sisteminin sanal bir iple birbirlerine bağlı olduğu düşünülmüş, devamında bu kabule dayanılarak formasyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Lider-takipçi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada quadrotorların bir bütün olarak hareket etmesi istenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları önerilen formasyon kontrolcüsünün quadrotorlar için rijit bir formasyon kontrolü sağladığını göstermiştir.

Yu *et al.* (2013), bir grup quadrotor için formasyon kontrol problemlerini incelemişlerdir. İlk olarak, quadrotor bir nokta-kütle sistemi olarak kabul edilmiş ve her bir quadrotorun dinamiği çift integral olarak modellenmiştir. Daha sonra, zamanla değişen formasyonu başarmak için bir fikir-birliğine dayalı protokol sunulmuştur. Sürü sistemleri için

formasyon kontrol problemleri, fikir birliği problemlerine dönüştürülmüştür. Zamanla değişen formasyonu başarmak için, quadrotor sürü sistemleri için gerekli ve yeterli şartlar önerilmiştir. Buna ek olarak, üç quadrotordan oluşan bir quadrotor formasyon platformu tanıtılmıştır. Yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar öneriler yöntemin başarısını göstermiştir.

Jasim & Gu (2018), lider-takipçi formasyon kontrol problemi için harici gürültüler ve model parametre belirsizliklerini dikkate alarak bir H_∞ kontrolcüsü geliştirmişlerdir. Ayrıca, önerilen kontrolcü performansını kıyaslamak adına önerilen yöntem integral-geri adımlamalı kontrolcü ile kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları, normal şartlar altında her iki kontrol yönteminin de iyi performans gösterdiği, ancak gürültü olması durumunda H_∞ kontrolcüsünün daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, deneysel sonuçlar incelendiğinde, H_∞ kontrolcüsünün gürültüye olan kararlılığı ve gürbüzlüğü açıkça görülmüştür.

Rui *et al.* (2017), bir grup quadrotorun parametre belirsizliklerini ve harici gürültüleri de dikkate alarak bir formasyon kontrol problemi üzerine çalışmışlardır. İlk olarak, quadrotoru kontrol etmek için sistemi iki ayrı alt sisteme ayırmışlar, devamında ise dönel ve ötelemeli hareketleri için iki ayrı adaptif kontrolcü tasarlamışlardır. İlk kontrolcü quadrotor için istenilen hız ve formasyon kontrolünü sağlamış, devamında ise dönel hareketin ihtiyacı olan uygun tork değeri üretilerek sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kapalı çevrim sistemin kararlılığı Lyapunov tabanlı kararlılık analizi ile ispatlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları önerilen kontrolcünün etkinliğini göstermiştir.

Ge & Han (2017), sınırlı iletişim halindeki bir çoklu sistemin kontrolü için dağıtık formasyon kontrol problemini çözmeyi amaçlamışlardır. İlk olarak, istenmeyen veri değişimlerini en aza indirmek için bir dinamik olay-tetikleme mekanizması tasarlamışlardır. Diğer var olan olay-tetikleme yöntemlerinden farklı olarak, önerilen dinamik yöntem bir dinamik kural vasıtasıyla dinamik olarak ayarlanmaktadır. Önerilen dinamik olay-tetikleme iletişim mekanizmasının sistem içi haberleşmede daha iyi olduğu ve beklenmeyen veri kayıplarını önleyerek sistemin beklenen formasyon kontrolünü daha iyi gerçekleştirdiği simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir.

Dong *et al.* (2017) iki serbestlik derecesine sahip bir çoklu İHA sistemi için zamanla değişen formasyon takip analizi ve tasarımı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, lider konumunda bulunan İHA'nın durumunda herhangi bir değişim meydana geldiğinde onu takip eden takipçi sistemleri uyaracak bir formasyon kontrol algoritması geliştirilmiş ve bu sayede takipçi sistemlerin formasyonu koruması sağlanmıştır. Ayrıca, önerilen yöntem graf teorisine göre tasarlanmıştır. Buna ek olarak, zamanla değişen

formasyon kontrolünün tasarımı için gerekli olan kısıtlar, yeterli ve gerekli şartlar gözetilerek Riccati denkleminden faydalanılarak çözülmüş ve önerilen yöntemin kararlılığı da Lyapunov kararlılık analizi ile ispatlanmıştır. Önerilen formasyon kontrolü, hem simülasyon hem de pratik uygulamada denemiş ve kontrolcünün etkinliği gösterilmiştir.

Liu *et al.* (2018) bir grup quadrotor için bir gürbüz formasyon kontrol problemi üzerinde çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, her bir quadrotorun dinamiği eksik tahrikli, yüksek doğrusal olmayan davranışa ve hem ötelemeli hem de dönel hareketlerinde gürültülere sahip olma özelliği gösterdiğinden gürbüz kontrolcü tasarımının önemini vurgulamışlardır. Önerilen dağıtık gürbüz kontrolcüsü, formasyon kontrolünün gerçekleştirildiği ötelemeli hareketin ve dönel hareketin kontrolünü sağlamak için tasarlanmıştır. Teorik analiz ve simülasyon çalışmaları önerilen formasyon kontrol yönteminin etkinliğini göstermektedir.

Liao *et al.* (2018) lider-takipçi arasındaki etkileşimi sağlayan ve doğrudan graf teorisi ile tasarlanan bir dağıtık adaptif formasyon kontrol yöntemini çoklu quadrotor sistemi için önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi, sistemin sahip olduğu belirsizliklerin yaklaşık olarak modellendiği tip-2 bulanık yapay sinir ağları tarafından modellenerek tasarlanmıştır. Ayrıca, tip-2 bulanık yapay sinir ağlarının parametrelerinin adaptasyon kuralları kararlılık analizinden türetilmiştir. Bununla beraber, lider ve takipçi arasındaki kontrolü sağlayan kontrolcünün kararlılığı Lyapunov kararlılık analizi ile ispatlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları incelendiğinde önerilen dağıtık adaptif formasyon kontrolcüsünün lider-takipçi arasındaki kontrolü sağladığını ve normal dağıtık ve yapay sinir ağları kontrol yöntemleri ile kıyaslandığında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Du *et al.* (2019), lideri takip eden bir grup quadrotor için dağıtık formasyon problemini çalışmışlardır. Ayrıca ilgili çalışmada, düzgün olmayan bir geri adımlamalı kontrol yöntemi kullanılarak, yeni bir konsensüs oluşum kontrol algoritması önerilmiş ve kullanılmıştır. İlk olarak, pozisyon kontrol alt sistemi için, doğrusal kuadratik regülatör optimal tasarım yöntemine dayanarak, çoklu quadrotor için formasyon kontrol yasası tasarlanmıştır. Devamında, konum kontrolü için birim kuaterniyon tarafından tanımlanan alt sistem, quadrotorların arzu edilen konumu takip etmesi için sonlu zaman kontrolü ve anahtar kontrolü tekniğini kullanarak, küresel sonlu zamanlı pozisyon izleme denetleyicisi tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmaları önerilen metodun geçerliğini göstermektedir.

Xuan-Mung & Hong (2019), bir grup quadrotorun formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için gürbüz adaptif formasyon kontrolü algoritması önermişlerdir. Lider-takipçi formasyon kontrolü göz önüne alınarak tasarlanan kontrol yöntemi, quadrotorun sistem dinamiklerinin sahip olduğu parametre belirsizlikleri göz önüne alınarak ve ayrıca

ihmal edilerek tasarlanmıştır. Önerilen yöntem, lider-takipçi arasında meydana gelebilecek hatadan yola çıkılarak tasarlanmış ve devamında formasyon hatasının dinamiklerinin doğrusal olmayan bir modeli türetilmiştir. Bununla birlikte, türetilen hata modeli quadrotorların x-y düzlemindeki hataları göz önünde bulundurduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, model referans adaptif kontrol aracılığıyla, bir gürbüz adaptif formasyon kontrolcüsü tasarlanmıştır. Önerilen kontrol algoritması simülasyon ortamında denenmiştir. Simülasyon çalışmaları önerilen yöntemin etkinliğini göstermiştir.

Yu *et al.* (2019) bir grup quadrotorun formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için adaptif KKK yöntemini kullanmışlardır. İlk olarak, quadrotorun dinamik denklemleri elde edilmiş, ardından doğrusal olmayan sistem dinamiklerindeki atalet matrisinde bulunan parametreler belirlenmiştir. Quadrotorun atalet matrisinde bulunan ve tam olarak bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi ve quadrotorların uygun bir düzende kontrollerinin gerçekleştirilmesi adına adaptiflik kuralı türetilmiştir. Bu sayede, adaptasyon kuralı kullanılarak dinamik olarak tasarlanan KKK'nün gürbüzlüğü arttırılmıştır. Böylece, sistem dinamiklerinde meydana gelen parametre değişimleri online olarak güncellenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon sonuçları önerilen kontrolcünün harici gürültü ve belirsiz durumlar altında başarılı bir formasyon kontrolünü sağladığı görülmüştür.

Rekabi *et al.* (2020), bir grup quadrotor için yeni bir gürbüz dağıtık formasyon kontrol algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma doğrusal olmayan ve sınırlı parametrik belirsizliklere sahip bir grup quadrotor için doğrusal olmayan H_∞ kontrolcüsüne dayanarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte önerilen çoklu quadrotor kontrol algoritması, formasyon kontrolündeki araçların bilgilerini ve birbirlerine komşu konumundaki quadrotorların verilerini kullanarak yerel kontrol kuralını azaltmaktadır. Simülasyon sonuçları önerilen gürbüz dağıtık kontrol algoritmasının harici gürültü ve sınırlı belirsizlikler altında etkin olduğunu göstermiştir.

Mazhar *et al.* (2020), çoklu quadrotor için gürbüz merkezi olmayan formasyon kontrol yöntemi önermişlerdir. Bir grup yönsüz iletişim graf teorili çok girişli-çok çıkışlı quadrotorlar için lidersiz formasyon kontrol protokolü önerilmiştir. İlk olarak 6 serbestlik derecesine sahip quadrotor iç döngü ve dış döngü olarak iki ayrı alt sisteme ayrılmıştır. Daha sonra, Euler açılarının kontrolünün gerçekleştirildiği iç döngünün kontrolü KKK yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Devamında ise, pozisyon ve formasyon kontrolünün gerçekleştirildiği dış döngüde ise Lyapunov kararlılık teoremi yardımıyla KKK'ye dayalı formasyon kontrol algoritması türetilmiştir. Önerilen yöntem MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir.

Zhao *et al.* (2020), bir grup quadrotorun tekrarlanan görevlerini çözmek için bir çift katmanlı formasyon kontrol yöntemi önermişlerdir. İlk katman, komşu quadrotorlar ile sanal lider quadrotor arasındaki mutlak mesafeye dayalı yinelemeli öğrenme kontrolünün tasarlandığı bir düzen hedefine ulaşmayı amaçlamaktadır. Formasyon kontrolcüsünün düzen formunu korumak ve her bir quadrotor için referans yörüngeyi oluşturmaktan sorumlu olduğu belirtilmiştir. İkinci katman ise, ilk katmandaki formasyon kontrolcüsünün üretmiş olduğu yörüngeyi takip etmesi için oluşturulmuştur. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çember formasyon kontrolünde önerilen kontrol yönteminin etkinliği gösterilmiştir.

Gonzales *et al.* (2020), harici gürültüler eşliğinde bir grup quadrotor için zamanla değişen formasyon kontrolünün gürbüz takibi sağlayacak bir sürekli KKK yaklaşımı önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi bir sonlu-zaman kayan kipli gözlemci ve hiyerarşik kaskad sürekli KKK yöntemlerine dayanmaktadır. Önerilen kontrolcü, tüm quadrotorların sistem dinamiklerine etkiyen gürültüye rağmen hem x , y , z eksenlerinde hem de quadrotorların duruş açısı kontrolünde oldukça başarılı formasyon kontrolünü sağladığı gözlemlenmiştir. Önerilen formasyon kontrol algoritması simülasyon ortamında test edilmiş ve formasyon kontrolcüsünün etkinliğini gösteren performansı sunulmuştur.

Lizzio *et al.* (2022), bir grup İHA'nın konsensüs tabanlı formasyon kontrolünü iletişim gecikmesinin varlığını dikkate alarak incelemişlerdir. İlk olarak, iletişim gecikmesinin konsensüs kontrol üzerindeki etkisini teorik olarak incelemişler ardından, formasyon anında meydana gelen gecikmeleri de dikkate alarak formasyon kontrol yöntemini tasarlamışlardır. Daha sonra, standart konsensüs tabanlı formasyon kontrol yöntemi de iletişim gecikmeli versiyonu ile ROS/Gazebo ortamında test edilmiştir. Her iki formasyon kontrol yönteminin performansları ve iletişim gecikmesinin gerçek zamanlı etkisi simülasyon ortamında incelenmiştir.

Zhou & Chen (2022), bir grup İHA'nın oluşturduğu bir formasyon kontrol problemini incelemişlerdir. Çalışmada, lider ve takip edenlerin her ikisinin de giriş sınırlamalarına tabi olduğu bir ortamda gerçekleştirilen yarı-global lider-takip konsensüs yaklaşımına odaklanılmıştır. Bu problemin çözümü için hem statik hem de uyarlanabilir dağıtılmış kontrol protokolleri olmak üzere iki farklı kontrol protokolü geliştirilmiştir. Bu protokollerin temel amacı, lider İHA'nın global olarak ulaşılabilir olduğu bir senaryoda yarı-global lider-takip konsensüs problemine çözüm sunmaktır. Konsensüs protokollerinin etkinliği simülasyon çalışmaları ve gerçek uçuş testleriyle başarıyla doğrulanmıştır.

Can & Başçi (2023), dört adet açık kaynak kodlu İHA'nın formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için GKTFK yöntemi önermişlerdir. Konsensüs protokolü gerçekleştirilmeden önce, İHA'ların çift integratör dinamiği sunulmuştur. İlk olarak, yönsüz-bağlı graf ile İHA'ların komşulukları tanımlanmış ve Laplacian matrisi elde edilmiştir. Daha sonra, gürbüz konsensüs formasyon protokolünü gerçekleştirmek için, kontrolcünün sahip olduğu K parametresi LME ile çözümlenmiştir. Ardından, önerilen GKTFK yönteminin etkinliği gerçek zamanlı saha testlerinde test edilmiş ve İHA'ların arzu edilen formasyon şekillerini başarıyla oluşturdukları görülmüştür.



MATERYAL ve YÖNTEM

Tezin bu bölümünde ilk olarak, simülasyon ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılan quadrotorun matematiksel modeli sunulmuş, ardından dinamik kontrol yapısı anlatılmıştır. Daha sonra, formasyon kontrolünü gerçekleştirmek için İHA'nın çift integratör dinamiği hakkında kısa bir bilgi verilmiştir. Ardından, formasyon uçuşunu gerçekleştirmek ve İHA'lar arasındaki komşulukları tanımlamak için graf teorisi anlatılmıştır. Ayrıca, gerçek zamanlı saha testlerini gerçekleştirmek için İHA'lar ile yer kontrol istasyonu arasındaki iletişimi sağlayan soket programlama yöntemi anlatılmıştır. Son olarak, hem GKTFK hem de AGKTFK yöntemleri anlatılmış, kararlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve bu tez kapsamında önerilen yeni formasyon kontrol yapısı sunulmuştur.

İnsansız Hava Aracı

İHA'lar, sahip oldukları avantajları ile insan gücü gerektiren alanlarda yüksek verim, minimum maliyet ve maksimum iş sağlamaktadırlar. Bu nedenle, bu tür sistemlerin geliştirilmesi hem ülke ekonomisine katkı sunacak hem de insan gücünden kaynaklı hataların azaltılmasına neden olacaktır. Bir İHA çeşidi olan quadrotorlar ise, düşük maliyetleri ve yaygın kullanım alanları (keşif, gözetleme, haritalama, saldırı vb.) nedeniyle birçok araştırmacı tarafından çalışılan popüler bir araştırma konusu olmuştur. Quadrotorlar; özellikle otonom uçuş özellikleri nedeniyle istenilen görevleri kolaylıkla yerine getirebilmektedirler. Bu sayede, hem gelişen elektronik sistemlerin quadrotorlara adapte edilmesiyle insan gücüne olan bağlılık azaltmakta hem de daha hassas ve tehlikeli görevler kolaylıkla halledilebilmektedir.

Günümüzde keşif vb. amaçlar için üretilen İHA'lar belirli hedefleri yok etmek için saldırı görevinde de kullanılmaktadırlar (Orman, 2018). Ayrıca İHA'lar, yaz aylarında ülkelerin orman yangınlarını tespit etmek ve sahip oldukları donanımlar aracılığıyla yangınları söndürmek amacıyla da özel amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır. Sağladığı erken uyarı sayesinde hem yangın kontrol merkezine haber vermekte hem de yangın söndürme özelliği bulunan İHA'lar ile yangınlar büyümeden söndürülebilmektedir. İHA'ların bir diğer fayda gösterdiği alan da arama-kurtarma görevleridir. İHA'lar havadan afet bölgesinin durumunu merkeze anlık iletebilir ve afetin boyutu hakkında yetkilileri bilgilendirebilir.

Tarımın yaygın olduğu coğrafyalarda İHA'lar tarım alanlarını yukarıdan görerek ilgili ekin alanının topografik haritasını çıkarabilir ve hatta ekinlerin sulama planlarını da yapabilirler. Eğer İHA yeterli donanım ve yazılıma sahip olur ise, ekinlerin verimi konusunda veri oluşturabilir ve zararlı enfeksiyonların yayılmasını önlemek amacıyla yetkililere haber verebilir. İHA'lar sinema ve eğlence sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

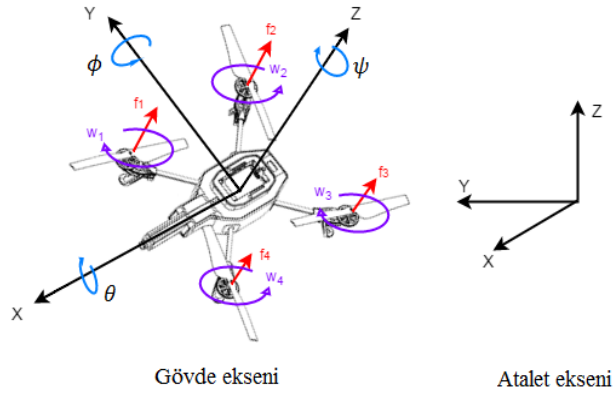
Bununla birlikte, son yıllarda İHA'ların sürü olarak bir arada toplu görev yapmalarını sağlayan formasyon kontrolü tezi ortaya konmuştur. Formasyon kontrolü temelde; sürü halinde bulunan İHA'ların arzu edilen uçuş düzeninde görevlerini icra etmelerini sağlamaktır. Gerçekleştirilen formasyon kontrolü ile İHA'ların daha karmaşık görevleri yerine getirmeleri sağlanmakla birlikte, verilen görevi başarıma oranları da belirgin bir biçimde arttırılmaktadır.

Dört rotorlu bir İHA'nın modellenmesi

Dört rotorlu bir İHA çeşidi olan ve Şekil 2'de gösterilen quadrotorun tasarımını gerçekleştirmek için, sistemimizin altı serbestlik derecesine ve on iki duruma sahip olduğunu göz önünde bulunduramamamız gerekmektedir (Can, 2017; Orman, 2018). Bu değişkenlerden rotasyonel hareketin gerçekleştirildiği ϕ, θ ve ψ (yuvarlanma, yunuslama ve yalpalama) açıları atalet eksenini ile gövde eksenini arasında bulunan Euler açılarını ifade etmektedir. Bununla birlikte, ilgili Euler açıları ile türevsel ilişkili olan p, q ve r açısal hızları ise gövde eksenini üzerinde bulunmaktadır (Can, 2017). Diğer altı durum değişkeni ise ötelemeli hareketin sağlandığı ve konum değişkenleri olan x, y ve z koordinat eksenleridir. Ayrıca x, y ve z konum değişkenleri atalet eksenini ile ilişkilidir. Bununla birlikte, konum değişkenlerimizle türevsel ilişkili olan ve gövde üzerindeki çizgisel hızı veren u, v ve w ifadeleri ise gövde eksenini ile ilişkilidir.

Bir quadrotorun tasarımını gerçekleştirmek ve hareket denklemlerini türetebilmek için aşağıdaki kabuller dikkate alınmalıdır (Biever 2015, Can & Başçi 2016; Can 2017).

- Quadrotorun esnemeyen (rijit) bir gövdeye sahip olduğu,
- Quadrotorun atalet matrisinin sadece üç eksen (x, y, z) boyunca mevcut olduğu,
- Quadrotorun gövde ekseninde bulunan iç dinamiklerinin değişmediği,
- Quadrotorun itki kuvvetlerinin doğrusal olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 2. Dört rotorlu bir İHA'nın eksenleri (Can *et al.*, 2016)

Dört rotorlu bir İHA'nın dinamik kontrol yapısı

Bir quadrotorun hareket denklemlerini tanımlamak için önce gövde eksenleri ile atalet eksenleri arasındaki bağıntı verilmelidir. Bunun için Şekil 2'de sunulan bir quadrotorun, gövde ile atalet eksenleri arasındaki ilişkinin rotasyon matrisi ($R: I \rightarrow B$) ile sağlandığı bilinmelidir. Böylece, quadrotorun $I \rightarrow B$ olarak tanımlanan eksenler arasındaki hareketi ise (1)'de belirtildiği gibi yazılabilir (Can, 2017).

$$R = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \quad (1)$$

Eğer (1) daha açık olarak yazılır ise,

$$R = \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

ifadesi edilir. (2) yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir (Can, 2017).

$$R = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\theta s_\theta c_\psi - c_\theta s_\psi & c_\theta s_\theta c_\psi + s_\theta s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\theta s_\theta s_\psi + c_\theta c_\psi & c_\theta s_\theta s_\psi - s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & s_\theta c_\theta & c_\theta c_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ayrıca, bir quadrotorun hareket dinamikleri altı serbestlik derecesine sahip bir cismin uzaydaki hareketine benzetilebilir (Tayebi & McGilvray, 2006). Hava aracına ait bu dinamikler $I = [e_x, e_y, e_z]$ ile ifade edilen atalet eksenleri ve $B = [b_1, b_2, b_3]$ ile ifade edilen gövde ekseninde tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, quadrotorun üç boyutlu uzayda herhangi iki nokta arasındaki hareketini matematiksel olarak tanımlamak için gerekli notasyonlar belirtilmelidir. İlk olarak, quadrotorun bulunduğu konum $\xi = (x, y, z)^T$, doğrusal eksenlerdeki hızları $v = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$, açısal hızları $\Omega = (p, q, r)^T$ ve eksenel duruş açıları $\varsigma = (\phi, \theta, \psi)^T$

şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca, sistemin genel dinamik eşitlikleri (4)'teki gibidir (Can, 2017).

$$\left. \begin{aligned} m\dot{v} &= TRe_z - mge_z \\ I\dot{\Omega} &= -\Omega * I\Omega - G + \tau \\ \dot{\xi} &= v, \dot{\zeta} = \Omega \\ m\dot{\xi} &= TRe_z - mge_z \\ I\dot{\zeta} &= -\zeta * I\zeta - G + \tau \\ \dot{R} &= R.sk(\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Burada, “ T ” rotorlar tarafından üretilen toplam itme kuvvetini, “ m ” İHA'nın kütesini, “ I ” ataletini, “ g ” yerçekimi ivmesini, “ G ” Jirooskopik torkları, “ $sk(\Omega)$ ” skew-simetrik matrisini ve $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ ise torkları ifade etmektedir. Ayrıca, her bir rotor tarafından üretilen toplam itme kuvveti (7)'deki gibi yazılabilir (Can, 2017).

$$T = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (5)$$

(5)'teki ifadede “ f_i ” ; i . rotor tarafından oluşturulan ve “ ω_i ” açısal hızı ile belirlenen kaldırma kuvvetini ifade etmekte olup aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$f_i = b\omega_i^2 \quad (6)$$

(4)'teki Jirooskopik torklar ise;

$$G = \sum_{i=1}^4 I(\Omega * e_z)(-1)^{i+1}\omega_i \quad (7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca, sistem tarafından üretilen tüm tork ifadeleri ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ b(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denklemden “ b ” itme faktörünü, “ d ” ise sürüklenme faktörünü ifade etmektedir. Böylece, yukarıda elde edilen denklemler aracılığıyla bir quadrotorun dinamik modeli (9)'daki gibi yazılabilir (Qianying, 2014). Ayrıca, (9)'da belirtilen denklemlerdeki “ $I_{x,y,z}$ ” ile ifade edilen atalet matrisi, bir quadrotorun gövdesinin x , y ve z eksenlerindeki ataletini, $\odot = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4$ ise rotorda jirooskopik etkiye neden olan artık devirleri ifade etmektedir (Can, 2017).

$$\left. \begin{aligned}
\dot{x} &= v_x \\
\dot{y} &= v_y \\
\dot{z} &= v_z \\
\dot{v}_x &= -(\sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) - \cos(\psi)\sin(\phi))\frac{T}{m} \\
\dot{v}_y &= -(\cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) + \sin(\psi)\sin(\phi))\frac{T}{m} \\
\dot{v}_z &= \left(\cos(\theta)\cos(\phi)\frac{T}{m}\right) - g \\
\dot{\phi} &= p + \sin(\phi)\tan(\theta)q + \cos(\phi)\tan(\theta)r \\
\dot{\theta} &= \cos(\phi)q - \sin(\phi)r \\
\dot{\psi} &= \sin(\phi)\sec(\theta)q + \cos(\phi)\sec(\theta)r \\
\dot{p} &= \left(\frac{I_y - I_z}{I_x}\right)qr + \left(\frac{I_r}{I_x}\right)q\odot + \frac{\tau_1}{I_x} \\
\dot{q} &= \left(\frac{I_z - I_x}{I_y}\right)pr + \left(\frac{I_r}{I_y}\right)q\odot + \frac{\tau_2}{I_y} \\
\dot{r} &= \left(\frac{I_x - I_y}{I_z}\right)qp + \frac{\tau_3}{I_z}
\end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Gerçek Zamanlı Saha Testlerinde Kullanılan Deneysel Ekipmanlar ve İletişim Protokolü

Bu bölümde saha testinde kullanılan yazılım algoritması, bağlantı protokolü ve kullanılan sistem elemanları tanıtılacaktır. Saha testlerinde, 4 adet İHA, bir adet modem ve bir adet yer kontrol istasyonu kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel düzeneğe ait resim Şekil 3'te sunulmuştur.

Gerçek zamanlı saha testlerinde kullanılan yer kontrol istasyonu; 2.5 GHz i5 Intel işlemciye, 8 GB RAM'e, 1 GB ekran kartına ve UBUNTU 18.04.6 LTI işletim sistemine sahiptir. Ayrıca, İHA'lar üzerinde ana bilgisayar olarak Raspberry Pi 3 ve 4 versiyonları kullanılmıştır (<https://www.raspberrypi.org/>). Kullanılan Raspberry kartlarında işletim sistemi olarak 32 bit Raspberry Pi OS işletim sistemi kurularak, İHA'ların gelen verileri ve kodları işlemesi sağlanmıştır. Bununla birlikte, her bir İHA; bir adet 3S LİPO bataryaya, bir adet GPS modülüne, bir adet Pixhawk 2.4.8 uçuş kontrol kartına sahip ve dört adet 10.45 inç pervaneye sahiptir (<https://pixhawk.org/>).



Şekil 3. Sürü İHA uygulamasında kullanılan deneysel ekipmanlar

Ayrıca, deney esnasında TCP/IP haberleşmesini sağlamak amacıyla her bir ekipmana verilen IP numaraları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneysel Ekipmanlar ve IP Listesi

Numara	İsim	IP No
1	Yer Kontrol İstasyonu	192.168.1.3
2	Router	192.168.1.1
3	İHA 1	192.168.1.11
4	İHA 2	192.168.1.12
5	İHA 3	192.168.1.13
6	İHA 4	192.168.1.14

İletişim Protokolleri

İnternet ortamında veri iletimi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar Aktarım Kontrol Protokolü (TCP/IP) ve Kullanıcı Veri Protokolü (UDP) olmak üzere iki çeşittir (Fall & Stevens, 1994).

TCP, bilgisayarlar arası iletişimde veri alışverişinin yanında kimlik doğrulaması da sağlayan bir protokoldür. Herhangi bir veri iletilmeden önce mutlaka bağlantı kurulmalıdır.

TCP veri iletimi sırasında, veri kaybı yaşatan paketler kontrol edilerek tekrar gönderilecektir. Böylece, TCP verinin güvenli bir şekilde iletilmesi açısından oldukça yararlı bir protokoldür.

UDP, TCP gibi verilerin güvenliğini garanti etmese de, yine de daha hızlı bir protokoldür. Genellikle ses ve video iletiminde kullanılır. UDP’de veriler bağlantı kurulmadan iletilir. Yani iletilen paketlerin teslim garantisini istemez.

Gerçekleştirilen saha testlerinde Soket Programlama aracılığıyla TCP/IP protokolü kullanılarak İHA’ların sürü uçuşu gerçekleştirilmiştir. Her bir İHA’ya 192.168.1.X (X: 1, ... , 4)’e kadar **Statik IP** verilmiştir. Böylece TCP’nin bağlantı tabanlı veri aktarım protokolünün ilk adımı gerçekleştirilmiştir. Sürü İHA’lar uçuşa başlamadan önce yer kontrol istasyonundan SSH (Secure Shell Host) aracılığıyla her bir İHA’nın üzerindeki mini bilgisayarlara ulaşmaktadır. Her bir İHA’nın ana bilgisayarlarındaki kod dosyalarına erişilerek formasyon uçuşu için gerekli kodlar çalıştırılmaktadır. Bu sayede, TCP/IP tabanlı kimlik doğrulamasından sonra ilgili veriler güvenli bir şekilde ilgili İHA’ya aktarılabilmektedir.

Tablo 2. TCP-UDP Arasındaki Farklılıklar

TCP	UDP
Güvenilirdir	Güvenli Değil
Bağlantı gereklidir	Bağlantı gerekmez
Yavaş	Hızlı
Veri iletim garantisi	Verilerin iletimini garanti etmez
Yüksek maliyetli	Düşük maliyetli

Soket Programlama

Soket Programlama, temel olarak bir istemci ve bir sunucunun birbiri ile bilgisayar ortamında veri alışverişinde bulunmasıdır. Soket kullanımı ilk olarak 1971’de ARPANET ile ortaya çıkmıştır (<https://realpython.com/python-sockets/>). Daha sonra, Berkeley Software Distribution (BSD) işletim sisteminde 1983 yılında Berkeley Soketleri adı altında bir API (Application Programming Interface - Uygulama Programlama Arabirimi) haline getirilmiştir.

Soket türleri

Pratik hayattaki uygulamalar için tanımlı birçok soket çeşidi mevcuttur. Ancak genel olarak üç tür soket yaygın olarak bilinmektedir. Bunlar aşağıdaki gibidir (Rhodes & Goerzen, 2010).

- **SOCK_STREAM:** Sıralı, güvenli, iki yönlü, bağlantı tabanlı veri alışverişi sağlamaktadır. Bu türde yapılacak bir soket iletişimini sağlamak için önceden istemci ile sunucu arasında bir bağlantı yapılmış olmalıdır. Güvenilirdir. Uygulama katmanında verinin kaybolmadığını garanti eder (uygulamada kullandığımız Soket türüdür, genellikle TCP/IP bağlantısı üzerinden oluşturulur).
- **SOCK_DGRAM:** UDP bağlantısı kullanılması durumunda kullanılan soket türüdür. Karşı tarafa bağlanmasına gerek yoktur. Sadece veri gönderileceği zaman; veri gönderilir ve bağlantı kapatılır. Güvenilir değildir.
- **SOCK_RAW:** TCP/IP'ye herhangi bir format olmadan ve sınır oluşturmadan oluşturulan soket türüdür. Bu nedenle, kullanımı yaygın değildir.

Uygulamada kullanacağımız soket türünü belirledikten sonra bir diğer konu ise protokol türünü belirlemektir. Bu protokoller ise aşağıdaki gibidir (Rhodes & Goerzen, 2010).

- AF_UNIX (UNIX internet protokolü)
- AF_INET (ARPA internet protokolü)
- AF_ISO (ISO protokolü)
- AF_NS (Xeros Network Sistemleri protokolü)
- AF_IMPLINK (IMP “host at IMP” link katmanı)

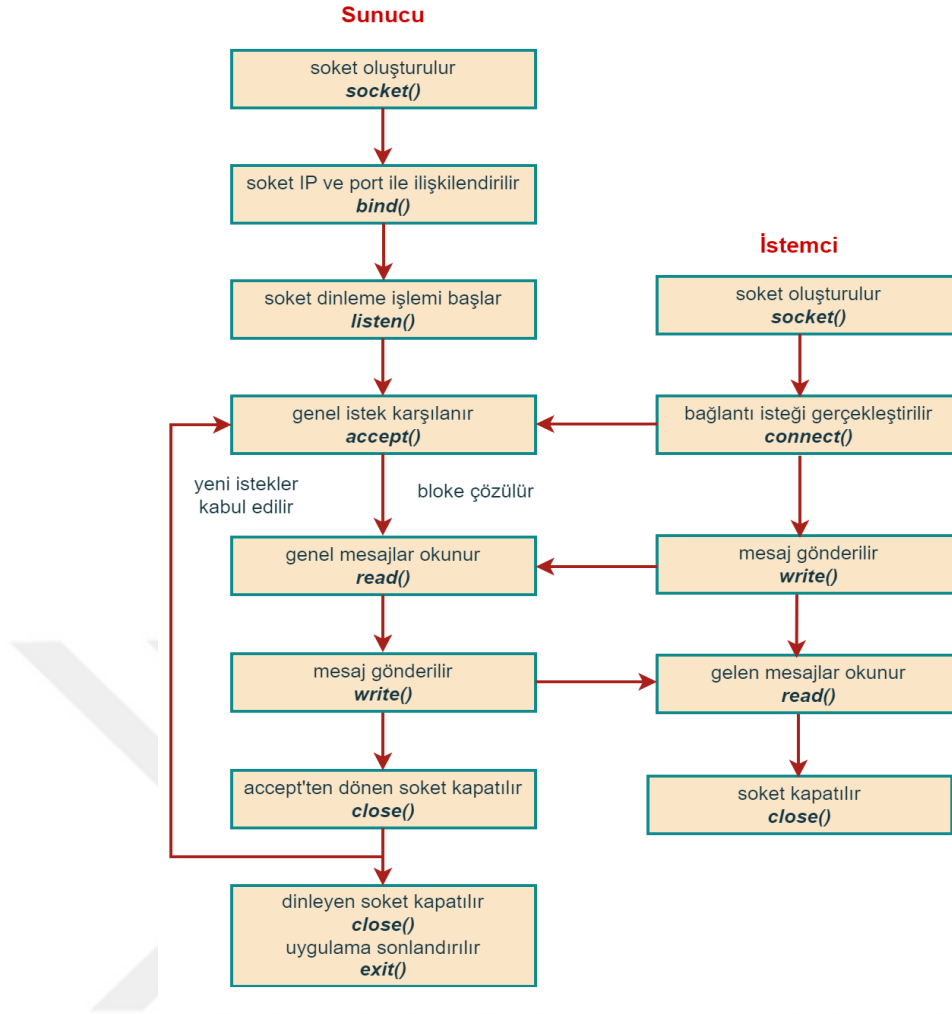
Saha uygulamasında kullandığımız soket haberleşmesinde protokol olarak **AF_INET** protokolü kullanılmıştır.

Soket API yapısı

Tez kapsamında uygulama noktasında kullanılan Python Soket API'leri aşağıdaki gibidir (Rhodes & Goerzen, 2010).

- **socket()** : soket oluşturur
- **.bind()** : bind fonksiyonu bir soketi bir adresle ilişkilendirir.
- **.listen()** : STREAM soketi üzerinden dinleme yapar
- **.accept()** : ilgili port üzerinden gelen bağlantı kabul edilir
- **.connect()** : bağlanma isteği karşı tarafa iletilir
- **.send()** : istemci-sunucu veri gönderir
- **.recv()** : istemci- sunucu veri alır
- **.close()** : soket bağlantısı sonlandırılır

Yukarıda belirtilen soket komutlarına ait akış ve işleyiş diyagramı aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 4. İstemci – Sunucu Yapısı (<https://demirten.gitbooks.io/linux-sistem-programlama/content/sockets/tcp.html>)

Kontrolcü Tasarımı

Gerçek zamanlı saha testlerinde ve simülasyon ortamında modellenen İHA'ların, iç kontrol ve dış kontrol olmak üzere iki alt kontrol dinamiği vardır. Bu tez çalışması için gerçekleştirilen formasyon kontrolünde, İHA'ların dış kontrol dinamiğine gerekli pozisyon bilgileri iletilmektedir. Bu nedenle, İHA'ların pozisyon kontrolünün gerçekleştirildiği kısım olan dış kontrol birimi üzerinden formasyon kontrolü gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, i . İHA'nın dış kontrolüne ait çift integratör dinamikleri aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir (Dong *et al.*, 2015);

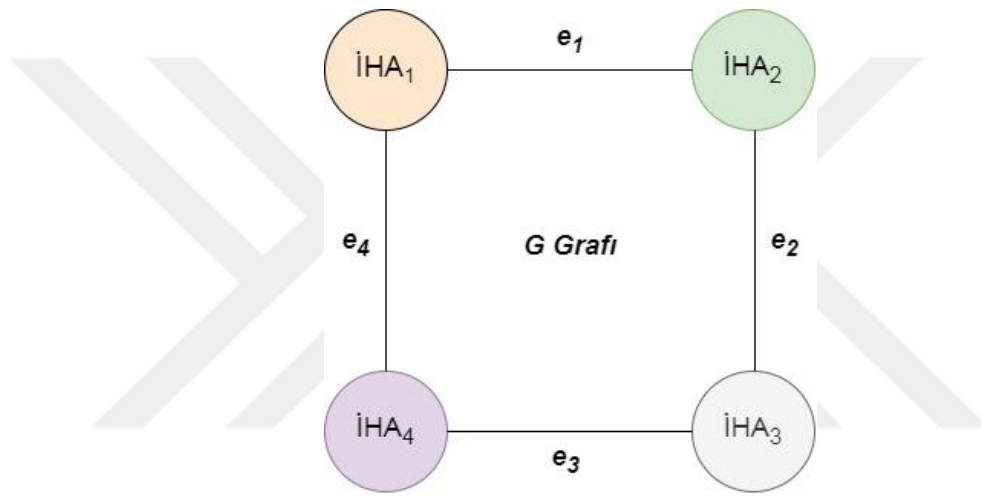
$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (10)$$

denklemden $i=1,2,\dots,N$ İHA sayısını temsil etmektedir. Ayrıca, $x_i(t) \in \mathbb{R}^m$ ve $v_i(t) \in \mathbb{R}^m$ i . İHA'nın konumu ve lineer hızı ve $u_i(t)$ ise sistemin kontrol girişidir.

Graf Teorisi

Graf teorisinde, düğüm kümesi ve kenarlar kümesi olmak üzere iki temel kavram bulunmaktadır. Düğümler kümesi; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ şeklinde gösterilir. $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ kenarlar kümesi olmak üzere $G = (V, E)$ yapısına GRAF denir. Graf yapısı temelde iki alt yapıdadır. Bunlardan ilki yönsüz-bağlı graf, diğeri ise yönlü-bağlı graflardır (Eski, 2013).

Yönsüz-bağlı grafta; kenarlar kümesinin belirli bir yönü yoktur. Bu tür bir graf yapısına bağlı komşuluklarda bilgi akışı çift yönlüdür. Diğer taraftan, yönlü-bağlı grafta ise; her bir kenar bir yöne sahiptir. Böylece, komşuluklar arasında bilgi akışının hangi düğümden hangi düğüme doğru olduğunu belirtir. Şekil 5'te, dört düğüm ve dört kenardan oluşan basit yapı bir yönsüz-bağlı graf örneği verilmiştir.



Şekil 5. Dört düğümlü ve dört kenarlı bir yönsüz - bağlı G grafi

Şekilde verilen G grafi; $\dot{I}HA_n \in V$ ile ifade edilen düğümden çıkan kenar sayısına ise o graftaki $\dot{I}HA_n$ düğümünün derecesi denir ve $D = diag[d_1, d_2, \dots, d_n]$ şeklinde yazılan bir köşegen matristir. Bir grafın derece matrisini bulmak için aşağıdaki ifadeden faydalanılmaktadır (Eski, 2013).

$$D(G) = d_{ij} = \begin{cases} d_i & ; \quad i = j \text{ ise} \\ 0 & ; \quad \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (11)$$

Ayrıca, G grafi; iki düğümü birbirlerine bağlayan bir kenar var ise bu iki noktaya komşu denir ve $\dot{I}HA_i \sim \dot{I}HA_j \in A(G)$ şeklinde gösterilir. Burada $A(G)$; n elemanlı bir G graf yapısının tüm komşuluklarını gösteren komşuluk matrisini ifade etmektedir ve (12)'deki gibi tanımlanmaktadır. Örneğin; Şekil 5'te verilen grafta; $\dot{I}HA_1$ düğümünün $\dot{I}HA_1 \sim \dot{I}HA_2$ ve $\dot{I}HA_1 \sim \dot{I}HA_4$ komşulukları görülebilmektedir (Eski, 2013).

$$A(G) = [a_{ij}]_{n \times n} = \begin{cases} 1 & ; \quad i \sim j \text{ ise} \\ 0 & ; \quad \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (12)$$

Tüm bu bilgiler kullanılarak, bir $G = (V, E)$ grafinin $D(G)$ derece matrisi ve $A(G)$ komşuluk matrislerinin farkı o grafin Laplacian matrisini ($L(G) = D(G) - A(G)$) vermektedir ve $L(G)$ matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Eski, 2013).

$$L(G) = [l_{ij}]_{n \times n} = \begin{cases} d_i & ; \quad i = j \text{ ise} \\ -1 & ; \quad i \sim j \text{ ise} \\ 0 & ; \quad \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (13)$$

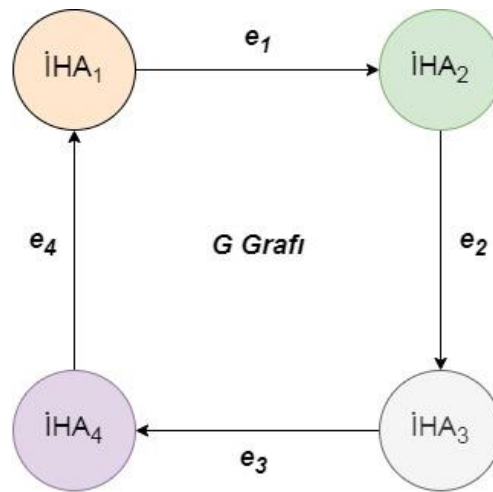
(13)'te tanımlanan $L(G)$ matrisi simetrik bir matristir ve satır ve sütunlarının toplamı sıfırdır. Örneğin; Şekil 4'te verilen G grafinin derece matrisi $D(G) = \text{diag}[2, 2, 2, 2]$ 'tür. Ayrıca ilgili grafin komşuluk matrisi ise;

$$A(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

şeklinde elde edilir. Böylece, Şekil 4'te verilen G grafinin Laplacian matrisi ise aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$L(G) = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Diğer taraftan, Şekil 6'da verilen bir G grafi için elde edilecek Laplacian matrisi farklı olacaktır. Çünkü ilgili graf yapısı yönlü-bağlı yapısındadır. Bu durumda elde edilecek komşuluk ve derece matrisleri Şekil 5'inkinden farklı olacaktır.



Şekil 6. Dört düğümlü ve dört kenarlı yönlü-bağlı bir G grafi

Şekil 6’da verilen G grafindaki her bir düğüm noktasının $(\dot{I}HA_n)$ sahip olduğu derece matrisleri elde edilmelidir. Ancak, bu tür yönlü-bağlı graflarda iki tür derece matrisi oluşmaktadır. Bunlar; düğüme giren kenarların toplamı ve düğümden çıkan kenarların toplamı olmak üzere iki çeşit olup sırasıyla $deg^-(\dot{I}HA_n)$ ve $deg^+(\dot{I}HA_n)$ şeklinde ifade edilirler.

İlk olarak, Şekil 6’da verilen G grafinın komşuluk (A_{ij}) matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Daha sonra, ilgili graf yapısına ait $deg^-(\dot{I}HA_n)$ matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$deg^-(\dot{I}HA_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

(16) ve (17)’de elde edilen komşuluk ve derece matrisleri aracılığıyla ilgili Laplacian matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$L^-(G) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Diğer taraftan, ilgili graf yapısına ait $deg^+(\dot{I}HA_n)$ matrisi de benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$deg^+(\dot{I}HA_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Benzer şekilde, $L(G) = D(G) - A(G)$ eşitliğinden, düğümden çıkan kenarlara ait Laplacian matrisi (20)’deki gibi elde edilir.

$$L^+(G) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Burada, dikkat edileceği üzere, yönlü-bağlı graf yapısındaki bir kümenin Laplacian matrisi elde edilirken düğüm noktalarına giren veya çıkan kenarların sayısı dikkate alınmaktadır.

Matris Teorisi

$A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ve $B \in \mathbb{R}^{p \times q}$ matrisleri için, kronecker çarpımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Dong, 2015).

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & a_{12}B & \cdots & a_{1n}B \\ a_{21}B & a_{22}B & \cdots & a_{2n}B \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & a_{m2}B & \cdots & a_{mn}B \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(mp) \times (nq)} \quad (21)$$

Ayrıca, uygun boyutlarda olduğu varsayılan A, B, C ve D matrisleri için; Kronecker çarpım özellikleri aşağıdaki gibidir (Dong, 2015; Boyd *et al.*, 1994).

- (i) $A \otimes (B + C) = A \otimes B + A \otimes C$;
- (ii) $(A \otimes B)(C \otimes D) = (AC) \otimes (BD)$;
- (iii) $(A \otimes B)^T = A^T \otimes B^T$;
- (iv) $(A \otimes B)^{-1} = A^{-1} \otimes B^{-1}$.

Tanım: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ tanımlı matrisi için, eğer A matrisinin tüm özdeğerleri negatif reel kısma sahip ise, A matrisi bir *Hurwitz* ya da kararlı bir matristir.

Teorem 3.1 Schur Tümleniyeni (Boyd *et al.*, 1994): Bir S matrisi için; $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$ tanımlanmış olsun. İlgili S matrisinin özellikleri aşağıdaki gibidir. Ayrıca, $S_{21} = S_{12}^T$ olduğunu kabul edelim. Bu durumda, lineer olmayan matris eşitsizlikleri LME'ye dönüştürülmesi mümkün olup aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır.

- (i) $S_{11} > 0$, $S_{22} - S_{21}S_{11}^{-1}S_{12} > 0$ ve,
- (ii) $S_{22} > 0$, $S_{11} - S_{12}S_{22}^{-1}S_{21} > 0$.

Yukarıda verilen matris eşitsizliklerinin sağlanması halinde; $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} > 0$ ifadesi pozitif tanımlı olacaktır (Uygur, 2010).

Lineer Sistem Teorisi

(22)'deki gibi lineer zamanla değişmeyen (LTI) bir sistem verilmiş olsun (Dong, 2015).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (22)$$

Denklemdede, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ve $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ ifadeleri sistemin katsayı matrislerini ve $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ve $y(t) \in \mathbb{R}^q$ sırasıyla durum, kontrol girdi ve çıktı fonksiyonlarını ifade etmektedir. Ayrıca, (A, B) matrislerinin kontrol edilebilir olduğu ve (C, A) matrislerinin de gözlemlenebilir olduğu kabul edilsin. Bu durumda, aşağıdaki ifadeler geçerli olacaktır.

Tanım: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is Hurwitz ise, (22)'de verilen sistem asimptotik kararlıdır (Dong, 2015).

Teorem 3.2 (22)'de verilen sistem için, aşağıdaki ifadeler eşdeğer olarak kabul edilmektedir (Dong, 2015).

- (i) (22)'deki sistem asimptotik kararlıdır;
- (ii) Herhangi bir pozitif Γ matrisi için, Lyapunov fonksiyonu $A^T P + AP + \Gamma = 0$ sağlayacak şekilde kesin-pozitif tanımlı bir P matrisine sahiptir.
- (iii) $A^T P + AP < 0$ şartını sağlayan kesin-pozitif bir P matrisi vardır.

Teorem 3.3 (Young's Eşitsizliği) Negatif olmayan gerçek p ve q sayıları için; eğer $m, n, \frac{1}{m} + \frac{1}{n} = 1$ ifadesini sağlıyorsa; $pq \leq \frac{p^m}{m} + \frac{q^n}{n}$ eşitliği yazılabilir (Li & Duan, 2014).

Konsensüs Tabanlı Formasyon Kontrol

Konsensüs tabanlı formasyon kontrolü; İHA'nın konum, hız veya ivme bilgilerini kendisine komşu herhangi bir İHA ile paylaşarak bir görev üzerinde fikir birliği sağlamalarına dayanmaktadır. Bu sayede, özellikle sürü İHA'ların formasyon uçuşlarını gerçekleştirirken komşu konumda bulunan İHA'ların referans formasyon şeklini gözeterek konum veya hızları üzerinde sağladıkları fikir birliği ile başarılı formasyon uçuşları sağlanmaktadır.

Gürbüz KTFK yaklaşımı

GKTFK yaklaşımında şekil 5'te sunulan yönsüz-bağlı graf topolojisi dikkate alınmıştır. Böylece, sürü içerisinde bulunan İHA'ların komşuluk matrisi aracılığıyla hız ve konum bilgilerini paylaşarak arzu edilen formasyon düzeni sağlanabilmektedir (Can & Başçi, 2022).

(23)'teki gibi lineer bir sistem düşünelim. Burada (A, B) stabilize edilebilirdir (Ren & Beard, 2008; Can & Başçi, 2022).

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t) \quad (23)$$

Denklemden $x_i \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ve $u_i \in \mathbb{R}^m$ olarak tanımlıdır. (23)'teki eşitlik kronecker çarpımı aracılığıyla aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\dot{x}(t) = (I \otimes A)x(t) + (I \otimes B)u(t) \quad (24)$$

(23)'teki eşitlikten yola çıkarak; $u(t) = -Kx(t)$ (durum geri besleme) olarak yazılabilir. Burada $u(t) = -(L \otimes K)x(t)$ olarak tekrar elde edilir. Denklemden, L Laplacian matrisini ifade etmektedir. Ayrıca, ilgili sisteme ait kapalı çevrim ifadesi ise aşağıdaki gibi elde edilir (Can & Başçi, 2022; Fried & Jarden, 2023).

$$\dot{x}(t) = [I \otimes A - (L \otimes BK)]x(t) \quad (25)$$

(25)'teki diferansiyel denklemin çözümü ise aşağıdaki gibidir (Fried & Jarden, 2023).

$$x(t) = e^{[I \otimes A - (L \otimes BK)]t} x(0) \quad (26)$$

(26)'daki $x(t)$ ifadesi sistemin durum yörüngesini, $x(0)$ ise sürü içerisinde bulunan araçların başlangıç durumlarını ifade etmektedir.

Ayrıca, $e^{[I \otimes A - (L \otimes BK)]t}$ ifadesi aşağıdaki gibi yeniden yazılır ise (Can & Başçi, 2022),

$$e^{[I \otimes A - (L \otimes BK)]t} = (P \otimes I) e^{[I \otimes A - (J \otimes BK)]t} (P^{-1} \otimes I) \quad (27)$$

eşitliği elde edilir. Denklemden; $J = P^{-1}LP = \text{diag}\{0, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n\}$ ($\lambda_2 \rightarrow$ en küçük özdeğer) olarak ifade edilir. Ayrıca, $P > 0$ matrisi simetrik bir matristir ve özvektörleri içermektedir (Can & Başçi, 2022). (27)'deki üstel ifade kronecker çarpımı yardımıyla aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir (Can & Başçi, 2022).

$$I \otimes A - (PJP^{-1}) \otimes BK = (P \otimes I)(I \otimes A)(P^{-1} \otimes I) - (P \otimes I)(J \otimes BK)(P^{-1} \otimes I) \quad (28)$$

Yukarıdaki eşitlik daha sade bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I \otimes A - (PJP^{-1}) \otimes BK = (P \otimes I)[I \otimes A - J \otimes BK](P^{-1} \otimes I) \quad (29)$$

Ayrıca, $(P^{-1} \otimes I) = (P \otimes I)^{-1}$ olarak tekrar ele alınırsa ve $e^{PBP^{-1}} = Pe^BP^{-1}$ yazılabildiğinden, (30)'daki eşitlik elde edilir (Ren & Beard, 2008; Can & Başçi, 2023).

$$I \otimes A - J \otimes BK = \text{diag}\{A, A - \lambda_2 BK, \dots, A - \lambda_n BK\} \quad (30)$$

(30)'daki eşitlik, eğer sistem yönsüz ve bağlı bir graf yapısında ise geçerlidir. Ayrıca, sistemin A matrisinin elemanları sabit olduğundan özdeğerleri de sabittir. Bu yüzden, K kazancının tasarımı ile GKTFK algoritması gürbüz hale getirilmelidir. Böylece, $\text{Re}(\lambda(A - \lambda_n BK)) < 0$ şartı sağlanabilir (Can & Başçi, 2022). Gürbüz bir konsensüs formasyon için uygun K kazancı; *Ricatti* denklemi için $PA + A^T P - \lambda_2 P B B^T P + Q = 0$ ($Q, P > 0$) aşağıdaki gibi seçilebilir (Ren & Beard, 2008; Can & Başçi, 2022; Guo & Meng, 2023).

$$K = \frac{1}{2} B^T P \quad (31)$$

Koşul 1: Eğer A matrisinin tüm özdeğerleri negatif reel kısma sahip ise, $PA + A^T P < 0$ olarak elde edilir. Ayrıca, İHA'ların KTFK algoritması türetilirken araçların hem konumu hem de lineer hızları üzerinden formasyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple GKTFK algoritması türetilirken, $J = P^{-1}LP$ matrisinin ilk iki elemanı sıfır olmalıdır. Bu durumda, sistemin en küçük özdeğeri $\lambda_3 > 0$ olmaktadır.

Elde edilen tüm eşitlikler, *Koşul 1* ve *Ricatti* denklem eşitliği aracılığıyla (32) elde edilmektedir (Can & Başçi, 2022; Wang & Meng, 2021; Guo & Meng, 2023).

$$(\lambda_3 - \lambda_n) P B B^T P - Q < 0 \quad (32)$$

(32)'deki ifadede $\lambda_3 < \lambda_n$ (burada λ_3 sistemin en küçük özdeğeri) olduğu için sistemin kararlı olduğu görülmektedir. (Can & Başçi, 2022). Yukarıda elde edilen denklemler aracılığıyla (23)'te ifade edilen sürü İHA sistemi için önerilen GKTFK yapısı aşağıdaki gibi sunulmuştur (Can & Başçi, 2022; Can & Başçi, 2023).

$$\varepsilon_i = -K \sum_{i=1}^n a_{ij} [\rho(x_i - x_j - \delta_{ij}) + \gamma((v_i - v_j - \dot{\delta}_{ij}))] \quad (33)$$

Denklemden $\rho, \gamma > 0$ sırasıyla konum ve hız için kullanılan konsensüs kontrolcü kazançlarıdır. (33)'te verilen GKTFK denkleminde arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için komşu iki İHA arasında olması istenilen formasyon mesafesi $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ile ifade edilmektedir. Bu eşitlik (33)'te sunulan GKTFK eşitliğinde göz önüne alındığında, tüm $x_i(0)$ ve $v_i(0)$ değerleri için, $t \rightarrow \infty$ iken $\|x_i - x_j\| \rightarrow \delta_{ij}$ ve $\|v_i - v_j\| \rightarrow \dot{\delta}_{ij}$ koşulu sağlanıyorsa, tüm sürü içerisinde konsensüs (fikir birliği) şartı yerine getirilmiş ve arzu edilen formasyon başarıyla gerçekleştirilmiştir (Ren & Beard, 2008; Can & Başçi, 2022).

Adaptif gürbüz KTFK yaklaşımı

Bu bölümde, bir önceki bölümde tanımlanan GKTFK yöntemi adaptif bir yapıya getirilmektedir. Böylece, GKTFK algoritması türetilirken sistemin gürbüzlük özelliği kazanmasını sağlayan K kazancı sabit bir değerdir ve değişmemektedir. Ancak, gerçek zamanlı saha testleri sırasında formasyon uçuşu gerçekleştirilirken rüzgar vb. bozucu etkiler de sistemin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, her ne kadar K kazancı sisteme gürbüzlük özelliği kazandırır da, değişken şartlar ve bozucu etkiler nedeniyle yeniden uygun kontrolcü kazancın elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, bu bölümde adaptif tabanlı GKTFK (AGKTFK) algoritması önerilmiştir.

İlk olarak, (23)'te tanımlı bir grup İHA için önerilen AGKTFK algoritması aşağıdaki gibi önerilmiştir.

$$u_{ai} = (\hat{c}_i)K\varepsilon_i \quad (34)$$

Denklemden $i = 1, 2, \dots, N$ (N İHA sayısını temsil etmektedir), ε_i (33)'te verilen konsensüs terimini, K daha sonra elde edilecek gürbüz kontrolcü kazancını ve $\hat{c}_i$ 'de adaptif kontrolcü kazancını temsil etmekte olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Lv *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021).

$$\left. \begin{aligned} \hat{c}_i(t) &= \eta_i(t) + \beta_i(t) \\ \dot{\eta}_i(t) &= \varepsilon_i^T \Gamma \varepsilon_i \\ \beta_i(t) &= \varepsilon_i^T P \varepsilon_i \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Ayrıca, denklemden $P > 0$ simetrik matristir ve Γ daha sonra elde edilecek uygun boyutlu bir matrisi temsil etmektedir.

Sistemin durumları, konsensüs eşitlikleri ve adaptasyon kazançları sırasıyla $x = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_N^T]^T$, $\varepsilon = [\varepsilon_1^T, \varepsilon_2^T, \dots, \varepsilon_N^T]^T$, $\eta = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)$ ve $\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$ ifade edilmektedir.

(34)'teki eşitlik (35) yardımıyla (23)'te yerine yazılırsa,

$$\dot{x}_i = Ax_i + B(\eta_i + \beta_i)K\varepsilon_i \quad (36)$$

eşitliği elde edilir.

(36)'daki eşitlik genel kronecker çarpımı şeklinde aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\dot{x}_i = (I_N \otimes A)x_i + [(\eta_i + \beta_i) \otimes BK]\varepsilon_i \quad (37)$$

(35) ve (37)'de tanımlı denklemler yardımıyla, aşağıdaki ifade elde edilir (Lv *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021).

$$\dot{\varepsilon}_i = [I_N \otimes A + \mathcal{L}_1(\eta_i + \beta_i) \otimes BK] \varepsilon_i \quad (38)$$

Yukarıda tanımlanan denklemler aracılığıyla, sistemin kararlılık analizini gerçekleştirmek için gerekli olan uygun Lyapunov aday fonksiyonu aşağıdaki gibi sunulmuştur (Lv *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021).

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N h_i(2\eta_i + \beta_i)\beta_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i - q_3)^2 \quad (39)$$

Denklemden q_3 pozitif bir skalerdir. (39)'da verilen Lyapunov fonksiyonunun türevi alınır, aşağıdaki ifade elde edilecektir.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N h_i[(\dot{\eta}_i\beta_i + \eta_i\dot{\beta}_i + \beta_i\dot{\beta}_i)] + \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i - q_3)\dot{\eta}_i \quad (40)$$

Yukarıdaki eşitlik daha sade biçimde aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i)\dot{\beta}_i + \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i - q_3)\dot{\eta}_i \quad (41)$$

Eğer (41)'de elde edilen ifade konsensüs hata tanımı ε cinsinden yazılırsa, (42)'deki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i)\varepsilon_i^T P \dot{\varepsilon}_i + \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i)\dot{\varepsilon}_i^T P \varepsilon_i \\ & + \sum_{i=1}^N h_i(\eta_i + \beta_i - q_3)\dot{\eta}_i \end{aligned} \quad (42)$$

(38)'de tanımlı olan denklem ifadesi (42)'de yerine yazılırsa, (43) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \varepsilon_i^T [h_i(\eta_i + \beta_i)(AP + \mathcal{L}_1(\eta_i + \beta_i) \otimes BKP)] \varepsilon_i \\ & + \varepsilon_i^T [h_i(\eta_i + \beta_i)(A^T P + \mathcal{L}_1^T(\eta_i + \beta_i)^T \otimes B^T K^T P)] \varepsilon_i \\ & + \varepsilon_i^T [h_i(\eta_i + \beta_i - q_3)\Gamma] \varepsilon_i \end{aligned} \quad (43)$$

Açıklama 1: Bu tez çalışmasında, AGKTFK algoritması elde edilirken sanal bir lider İHA tanımlamak yerine; önerilen formasyon kontrolcüsüne İHA'lara yeni bir koordinat noktası atayan bir pozisyon kontrol algoritması u_{ti} eklenmiştir. Böylece, İHA'lar hem yeni

formasyon şeklini farklı bir koordinatta oluşturmakta hem de formasyon pozisyonuna giderken konum kontrolü yapmaları sağlanmaktadır. Bu durumda, pozisyon kontrol algoritması sanal bir lider olmamasına rağmen yeni koordinat noktasına İHA'ları yönlendirmektedir. Bu nedenle, önerilen formasyon kontrolcüsü türetilirken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

Kabul 1. Tekil olmayan bir $\mathcal{L}_1$ matrisi için; pozitif bir diyagonal H matrisinin var olduğu ve $H\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_1^T H \geq \sigma_0 I$ ifadesini sağladığı varsayılmaktadır. Burada σ_0 pozitif bir sabittir (Lv *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021).

(43)'te sunulan ifade *Kabul 1*'deki eşitlik yardımıyla tekrar düzenlenirse ve $K = -B^T P$ ve $\Gamma = PBB^T P$ kazançları şeklinde tanımlanırsa; (44)'teki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \varepsilon_i^T [(\eta_i + \beta_i)(AP + A^T P - (\eta_i + \beta_i)(H\mathcal{L}_1 \\ & + H\mathcal{L}_1^T)(\eta_i + \beta_i) \otimes \Gamma)] \varepsilon_i + \varepsilon_i^T (\eta_i + \beta_i - q_3)H \otimes \Gamma \varepsilon_i \end{aligned} \quad (44)$$

(44)'teki ifade tekrar düzenlenirse, (45) elde edilir.

$$\dot{V} \leq \varepsilon_i^T [(\eta_i + \beta_i)H \otimes (AP + A^T P + \Gamma) - [\sigma_0(\eta_i + \beta_i)^2 + q_3 H] \otimes \Gamma] \varepsilon_i \quad (45)$$

Kabul 1'de verilen özelliği kullanarak, (45) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\dot{V} \leq \varepsilon_i^T [(\eta_i + \beta_i)H \otimes (AP + A^T P + \Gamma) - 2\sqrt{\sigma_0 q_3 H}(\eta_i + \beta_i) \otimes \Gamma] \varepsilon_i \quad (46)$$

Eğer $q_3; q_3 \geq \frac{9h_{max}}{4\sigma_0}$ ifadesini sağlayacak kadar büyük seçilirse, (47) elde edilir.

$$\dot{V} \leq \varepsilon_i^T [(\eta_i + \beta_i)H \otimes (AP + A^T P - 2\Gamma)] \varepsilon_i \quad (47)$$

Yukarıda elde edilen ifadeden de anlaşılacağı üzere; sabit ifadelerin η, β ve $H > 0$ olduğu ve böylece, $AP + A^T P - 2\Gamma < 0$ ifadesinin $P > 0$ koşulu altında sağlandığı görülecektir. Böylece, kararlılık ispatı için tanımlanan Lyapunov aday fonksiyonunun türevi $\dot{V} < 0$ olacak şekilde elde edilecektir. Sonuç olarak, kararlılık problemi çözülmüş ve $\hat{c}_i$ adaptasyon kazançlarının bazı sonlu durum değerlerine yakınsadıkları ispatlanmıştır (Lv *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021).

Açıklama 1'de bahsedildiği gibi, yeni formasyon konumunun belirlenmesi için önerilen kontrolcü yapısı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_{ti} = & \left(\ddot{\delta}_{ij} + \ddot{\Delta}_{ij}(t) \right) - \mu \left(x_{ij}(t) - (\Delta_{ij}(t) + \delta_{ij}) \right) \\ & - \varphi(\dot{x}_{ij}(t) - (\dot{\Delta}_{ij}(t) + \dot{\delta}_{ij})) \end{aligned} \quad (48)$$

Denklemden μ ve φ sırasıyla konum ve lineer hız kontrolcü kazançlarıdır ve bu çalışmada $\mu = 1.5$ ve $\varphi = 1.1$ olarak alınmıştır. Ayrıca Δ ; İHA'ların x ve y eksenleri boyunca atanan yeni formasyon koordinat konumlarını temsil etmektedir. Bu nedenle, tüm sistem tek bir vücut gibi düşünülmelidir. Bunun için (49)'da verilen ortalama konum denklemi kullanılmıştır.

$$\Delta_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_{ij} \quad (49)$$

(49)'da verilen ifadede Δ_m ; tüm sürünün x ve y ekseninde sahip olduğu merkez konumların ortalamasını temsil etmektedir. Ayrıca, $\Delta_d \in \mathbb{R}^n$ 'nin tüm sistemin merkezi tarafından ulaşılması gereken yeni x ve y konumlarını temsil etmektedir. Bununla birlikte, uçuş anında sürünün doğru konumda arzu edilen formasyonu icra edebilmeleri için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekmektedir.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta_d - \Delta_m = 0, t \geq 0 \quad (50)$$

(50)'deki ifade sonucunda hata meydana gelmesi durumunda, ilgili konum hatasını elimine etmek için kullanılacak PD kontrol algoritması aşağıdaki gibidir.

$$u_{ti} = k_p(\Delta_d - \Delta_m) + k_d(\dot{\Delta}_d - \dot{\Delta}_m) \quad (51)$$

Denklemden k_p ve k_d sırasıyla konum ve hız kontrolcü kazançları olup bu çalışmada $k_p = 1.1$ ve $k_d = 0.38$ olarak alınmıştır.

Ayrıca, İHA'lar arasında herhangi bir çarpışmayı önlemek için aşağıda verilen İtici Mors Potansiyeli yöntemi olarak bilinen çarpışmadan kaçınma algoritması eklenmiştir (Toksöz *et al.*, 2019).

$$u_{ij}^r = \begin{cases} \theta(e^{-\vartheta\|r_{ji}\|} - e^{-\vartheta\|r_s\|}); & \text{if } \|r_{ji}\| \leq r_s \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (52)$$

Yukarıdaki eşitlikte, $\theta = 1$ kontrolcü kazancını, $\vartheta = 0.8$ üstel ölçeğini, $|r_{ij}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ifadesi ise komşu İHA_i ile İHA_j arasındaki ölçülen mesafeyi, r_s ise İHA'lar arasındaki güvenli referans mesafeyi temsil etmektedir. Bu çalışmada $r_s = 1$ olarak alınmıştır. Sonuç olarak, bu tez çalışması için önerilen AGKTFK yapısı aşağıdaki gibidir.

$$u_T = u_{ai} + u_{ti} + u_{ij}^r \quad (53)$$

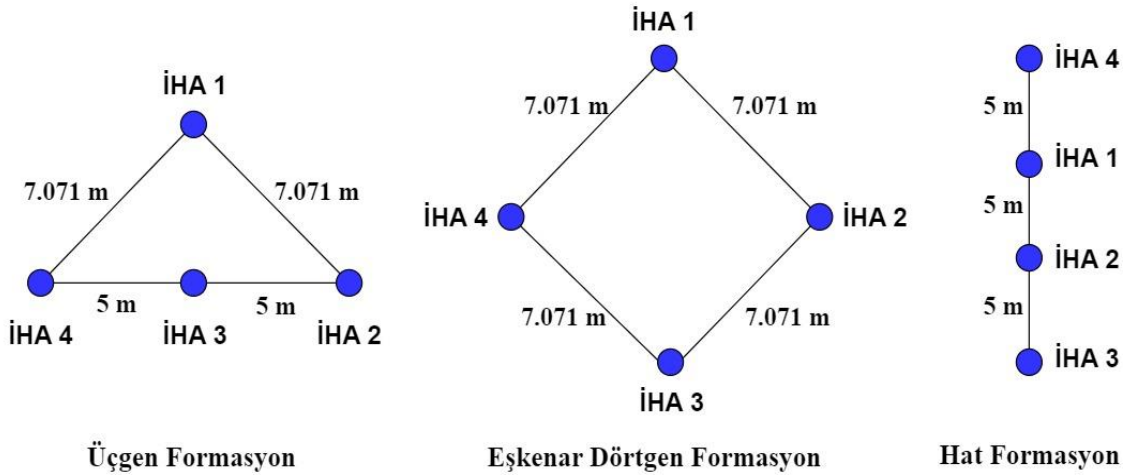
ARAŞTIRMA BULGULARI

Simülasyon Sonuçları

Tezin bu bölümünde, GKTFK ve AGKTFK yöntemlerine ait simülasyon ve gerçek zamanlı saha test sonuçlarından elde edilen bulgular sunulmuştur.

GKTFK yöntemine ait simülasyon sonuçları

Şekil 7’de GKTFK yöntemi için İHA’ların simülasyon ortamında gerçekleştirdikleri referans formasyon şekilleri sunulmuştur. İlk formasyon şekli olan üçgen formasyonu için İHA₁ ile İHA₂ ve İHA₁ ile İHA₄ arası mesafeler 7.071 metre; İHA₂ ile İHA₃, İHA₃ ile İHA₄ ve İHA₁ ile İHA₃ arası mesafeler ise 5 metre olarak alınmıştır. İkinci formasyon şekli olan eşkenar dörtgen formasyonunda ise, İHA₁ ile İHA₂, İHA₂ ile İHA₃, İHA₃ ile İHA₄ ve İHA₄ ile İHA₁ arası mesafeler 7.071 metre olarak alınmıştır. Son formasyon şekli olan hat formasyonunda ise; İHA₁ ile İHA₂, İHA₂ ile İHA₃ ve İHA₁ ile İHA₄ arası mesafeler 5 metre olarak alınmıştır.

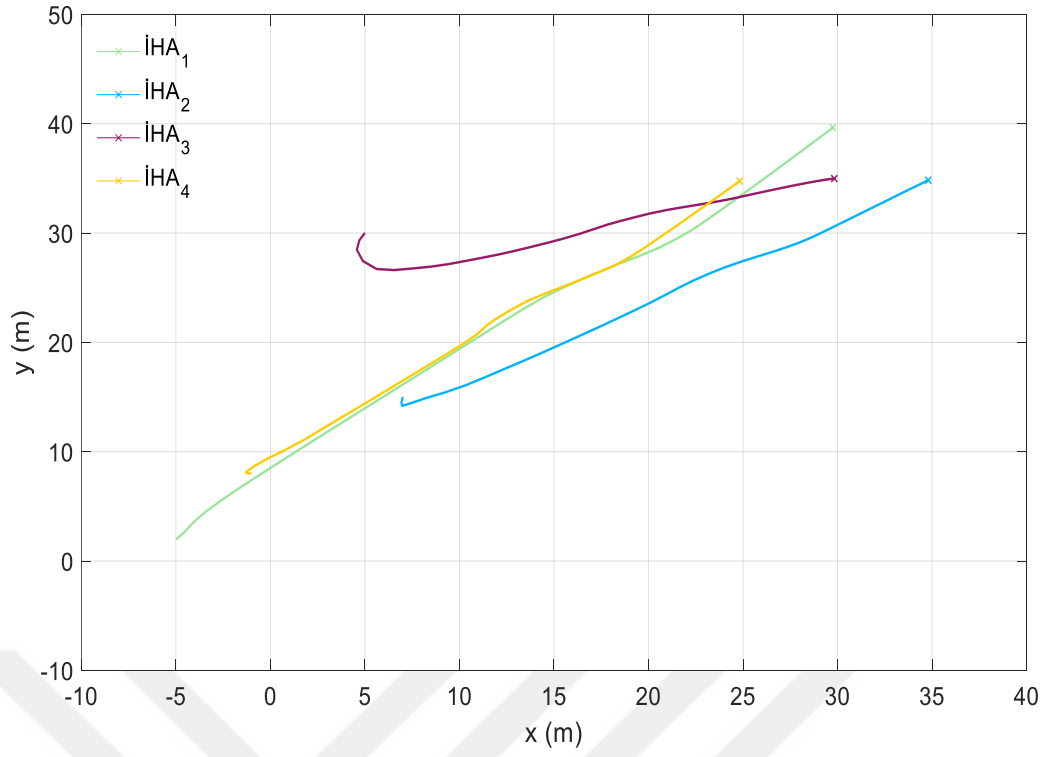


Şekil 7. İHA’ların simülasyon çalışmalarında GKTFK için gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri ve mesafe bilgileri

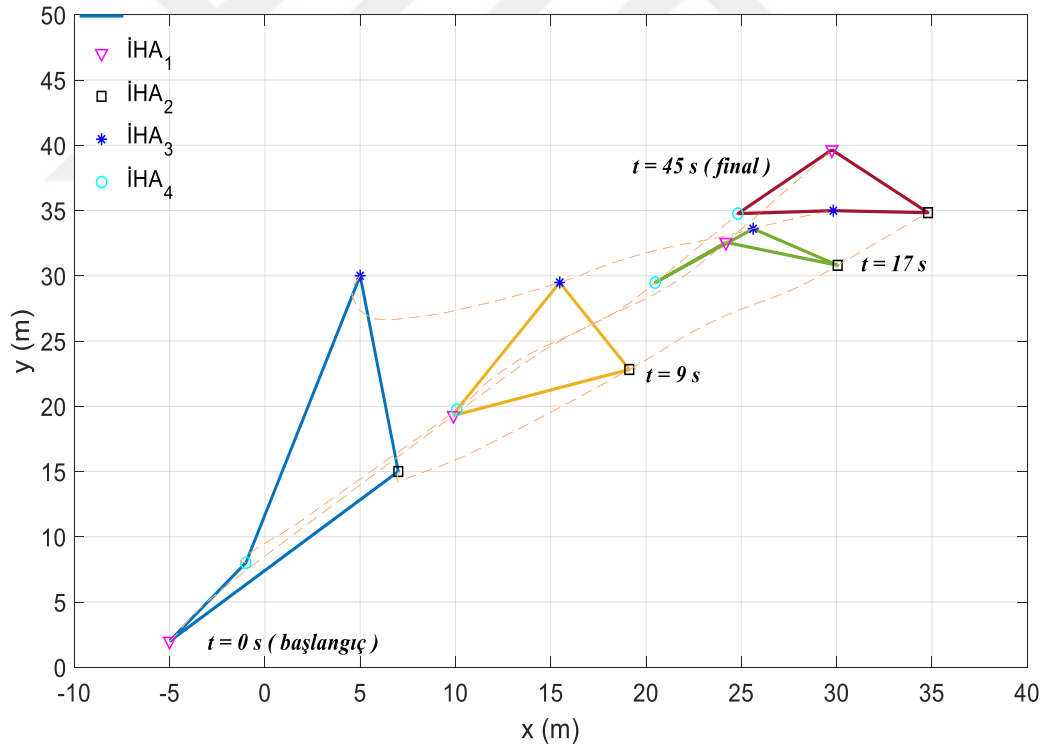
Şekil 8’de İHA’ların üçgen formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri sunulmuştur. Bu uçuş için İHA’lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} -5 & 7 & 5 & -1 \\ 2 & 15 & 30 & 8 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. Şekilde İHA₁’in başlangıç konumundan itibaren özellikle İHA₄ ile birlikte hareket ettiği ve sürü içerisinde bulunan diğer İHA’lar ile bilgi paylaşımı sağlayarak arzu edilen formasyon konumuna geldiği görülmektedir. İHA₂’nin formasyon oluşumu sırasındaki yörünge hareketleri incelendiğinde;

üçgen formasyonunu oluşturmak için x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ettiği ve yaklaşık olarak 35. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmektedir. İHA₃'ün yörunge hareketi incelendiğinde ise, başlangıç anında y ekseninin tersinde hareket ettiği devamında ise kavisli bir dönüş hareketi gerçekleştirerek x eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık 30. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmektedir. Son olarak, İHA₄'ün başlangıç anından formasyon konumuna varıncaya kadar İHA₁ ile birlikte yol aldığı ve yaklaşık olarak 25. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, uçuş boyunca ilgili İHA'lar arasında herhangi bir çarpışmanın yaşanmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, dört İHA'nın da GKTFK yöntemi ile üçgen formasyonunu başarılı bir şekilde gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 9'da ise İHA'ların 0 (başlangıç), 9, 17 ve 45. (final) saniyelerdeki formasyon oluşum adımları sunulmuştur. Başlangıç anında İHA'ların dağınık bir şekilde konumlandıkları görülmektedir. Ancak 9. saniyede İHA'ların üçgen formuna geldikleri, özellikle İHA₁ ve İHA₄'ün birbirlerine çok yakın hareket etmelerine rağmen, arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için uygun komşuluk düzenine geçtikleri görülmektedir. Ayrıca, İHA'ların 17. saniyedeki formasyon düzenleri incelendiğinde, İHA₁'in sürünün merkezinde kaldığı ve devamında, 45. saniyede sürünün önüne geçerek üçgen formasyonunu başarılı bir şekilde oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 9. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 10'da İHA'ların üçgen formasyon uçuşu süresince x ve y eksenı boyunca izledikleri yörünge ve lineer hız bilgileri verilmiştir. Şekilde İHA₁'in x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan -5. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve eksen boyunca hareketini ileri yönde devam ettirerek, yaklaşık 27. saniyeden sonra İHA₃ ile aynı yönde hareketine devam ettiği ve yaklaşık olarak 45. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği görülmüştür. Ayrıca, İHA'nın x eksenı boyunca sahip olduğu lineer hızı incelendiğinde, İHA'nın başlangıç anından itibaren ileri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık olarak 2.2 m/s değerine yükseldiği ve hız değerinin 5 ile 13. saniyeler arasında ise sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Devamında, 13. saniyeden itibaren İHA'nın hız değerinin azalarak yaklaşık 30. saniyede sıfır değerine gerilediği ve bu noktada sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri görülmektedir. Diğer yandan, ilgili İHA'nın y eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde ise, 2. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve y eksenı boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık 40. metrede arzu edilen formasyon düzenine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın y eksenindeki lineer hızı incelendiğinde, başlangıç anından itibaren İHA ileri yönde hareket ettiğinden hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık olarak 2.2 m/s değerine ulaştığı ve bu hız değerini 13. saniyeye kadar koruduğu gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'nın hızını azaltarak 30. saniyede sıfır değerine düşürdüğü ve bu noktada diğer sürü üyeleri ile fikir birliği sağlayarak arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri görülmektedir.

Şekil 10'da İHA₂'nin x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan 7. metreden harekete başladığı ve 15. saniyede yaklaşık olarak 30 metreye ve 45. saniyede ise arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın x eksenı boyunca sahip olduğu lineer hız verileri incelendiğinde, hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık olarak 2.1 m/s değerine ulaştığı ve devamında ise hız değerinin azalarak 12. saniyede yaklaşık olarak 1.4 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. İHA'nın hız değeri 15. saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsamış ve 30. saniyede diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı görülmüştür. Diğer yandan, İHA'nın y eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde ise, formasyon hareketine 15. metrede başladığı devamında, formasyonun ilk anlarında y ekseninde ters yönde hareket etmesine karşın, 15. saniyede 30. metreye ulaştığı görülmüştür. Sonrasında, İHA'nın y eksenı boyunca hareketine devam ettiği ve yaklaşık 32. saniyeden itibaren İHA₃ ve İHA₄ ile aynı hizaya gelerek arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. İHA'nın y ekseninde sahip olduğu hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anındaki ters yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin yaklaşık olarak -1 m/s değerinde olduğu devamında ise İHA'nın ileri yönlü hareketine bağlı

olarak hız değerini arttırarak 5. saniyede yaklaşık 1.5 m/s değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'nın hız değerini yaklaşık 12. saniyeye kadar koruduğu ve 13. saniyeden itibaren hız değerini azaltarak sıfıra indirdiği görülmüş ve 32. saniye itibari ile sürünün fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 10'da İHA₃'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan 5. metreden harekete başladığı ve 15. saniyede yaklaşık olarak 25 metreye ulaştığı görülmektedir. Ardından, İHA'nın yaklaşık olarak 30. saniyede İHA₁ ile aynı ekseninde hareket etmeye başladığı ve yaklaşık 30. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, İHA'nın ilk 2 saniye içerisinde x ekseninde ters yönde hareket etmesi nedeni ile hız değerinin yaklaşık -0.5 m/s değerinde olduğu ve ardından, İHA'nın ileri yönlü hareket etmesiyle hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Devamında ise, İHA'nın hız değeri 12. saniyede bir miktar düşüş gösterse de, hız değerinin 13. saniyede tekrar 1.8 m/s değerine yükseldiği ve sonrasında hız değeri azalarak yaklaşık 30. saniye civarında sıfır değerine gerilediği ve böylece İHA'nın sürü ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, İHA₃'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 30. metrede formasyon hareketine başladığı ve devamında ise, ilk 4 saniye boyunca y ekseninde ters yönde hareket ettiği görülmektedir. Sonrasında, 30. saniyeye kadar ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek İHA₂ ve İHA₄ ile aynı doğrultuya geldiği ve her üç İHA'nın da yaklaşık 35. metreye ulaşarak arzu edilen formasyon konumlarına ulaştıkları görülmektedir. Ayrıca, İHA₃'ün y eksindeki hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anında ters yöndeki hareketinden kaynaklı olarak hız değerinin yaklaşık -2 m/s değerine gerilediği ve devamında, İHA'nın ileri yönlü hareket etmesiyle hızının da artarak 11. saniyede yaklaşık 0.5 m/s değerinde olduğu görülmüştür. Devamında, arzu edilen formasyon konumuna yaklaşarak yaklaşık 32. saniyede sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı ve başarılı bir formasyon oluşturdıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 10'da İHA₄'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı ve 15. saniyede yaklaşık olarak 20. metreye ulaştığı görülmektedir. Ardından, İHA'nın 30. saniyeden itibaren arzu edilen formasyon konumuna gelerek formasyonu tamamladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, hız değerinin formasyon başlangıcında -0.5 m/s değerine gerilesine karşın 4. saniyeden itibaren artarak 2 m/s değerine yükseldiği ve ardından, 12. saniyede sürüdeki diğer İHA'lar ile çarpışmadan kaçınmak için hız değerini azaltarak yaklaşık 1 m/s değerine düşürdüğü görülmektedir. Devamında ise, hız değeri tekrar artarak 2

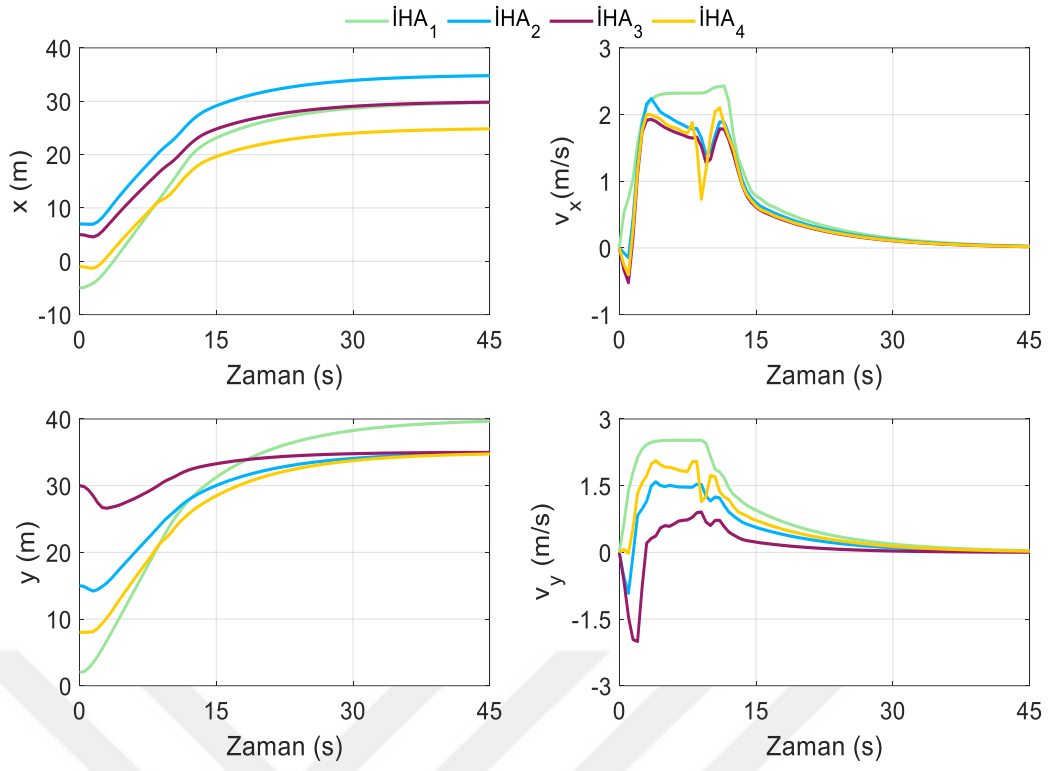
m/s değerine yükselmiş fakat sonrasında arzu edilen formasyon konumuna yaklaşılmaya başlaması nedeni ile 30. saniyede sıfır değerine gerileyerek sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, İHA₄'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, formasyon hareketine 8. metrede başladığı ve ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 30. saniyede arzu edilen formasyon konumuna ulaşarak İHA₂ ve İHA₃ ile aynı doğrultuya geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık 1.8 m/s değerine yükseldiği ve 11. saniyeye kadar hız değerini küçük salınımlarla bu değerde koruduğu gözlemlenmiştir. Devamında ise, 12. saniyede çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesiyle hız değeri yaklaşık 1.4 m/s değerine gerilemiştir. Sonrasında, hız değeri hafif artış göstermiş olmasına rağmen, 13. saniyeden itibaren azalmaya başladığı ve 30. saniyede sıfır değerine yakınsadığı görülmüş ve bu noktada sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak başarılı bir formasyon gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 11'de İHA'ların üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen hata değerleri İHA'ların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. Şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'ların başlangıç anında hız değerlerinin sıfır olmasından kaynaklı olarak hata değerleri sıfırdır. Formasyon uçuşunun başlamasıyla İHA'lar arasındaki hata değeri artarak 2.5 m/s değerine yükselmiş ve devamında ise hız değeri 4. saniyeye kadar azalarak 1 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, 5 ile 10. saniyeler arasında çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesiyle İHA'lar arasındaki hata değerinin tekrar artış gösterdiği ve devamında, hata değerinin azalarak yaklaşık 32. saniyede sıfır olduğu görülmektedir.

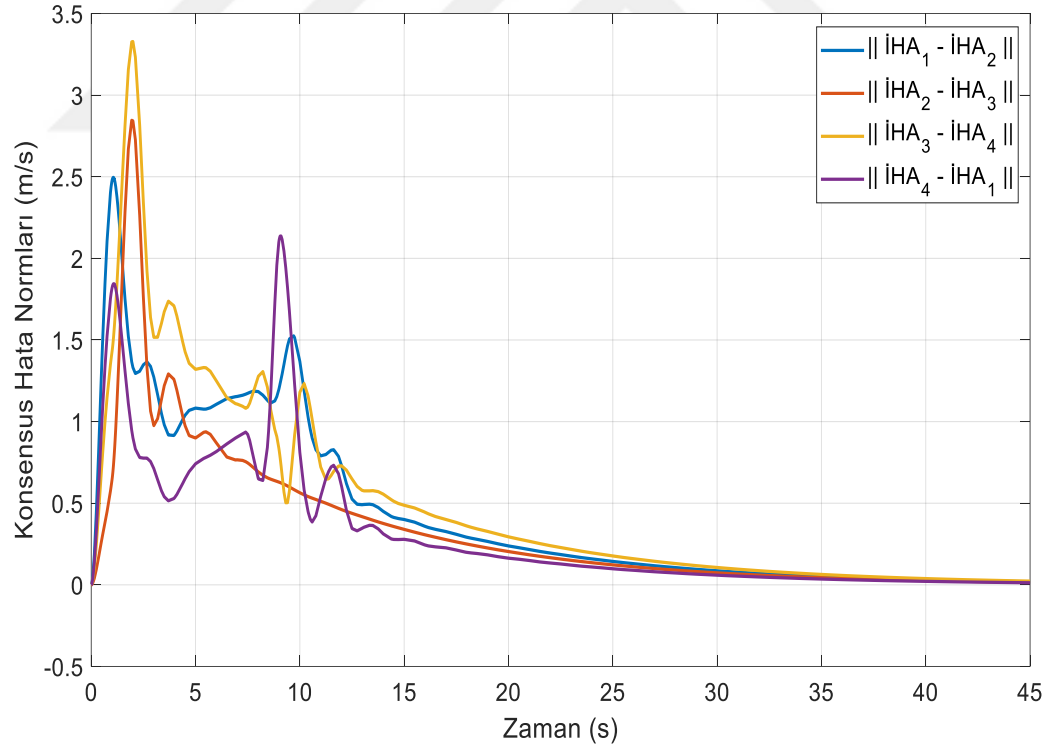
Şekil 11'de turuncu renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. İHA'lar arasındaki hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 2.7 m/s olduğu devamında İHA'lar arasındaki mesafe hatasının azalmasıyla hata norm değerinin de azaldığı ve 32. saniyeden itibaren hata değerinin sıfıra yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca sarı renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. İHA'lar arasındaki hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 3.3 m/s değerinde olduğu ve devamında formasyon kontrolcüsü ile hata değerinin azalarak 9. saniyede yaklaşık 0.5 m/s değerine gerilediği görülmüştür. Ancak, 10. saniyede çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesiyle İHA'lar arasındaki hata değerinin tekrar artarak 1.2 m/s değerine çıktığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, 12. saniyeden

itibaren İHA'lar arasındaki hata değerinin azalarak 32. saniyede sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir. Son olarak, mor renk ile gösterilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. İHA'lar arasındaki hata değerinin 2. saniyede yaklaşık 1.75 m/s değerinde olduğu devamında, hata değerinin azalarak 4. saniyede yaklaşık 0.5 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Diğer yandan, çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesiyle ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin tekrar artarak 2.1 m/s değerine yükseldiği ve sonrasında algoritmanın devreden çıkmasıyla hata değerinin azalarak 32. saniyede sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.





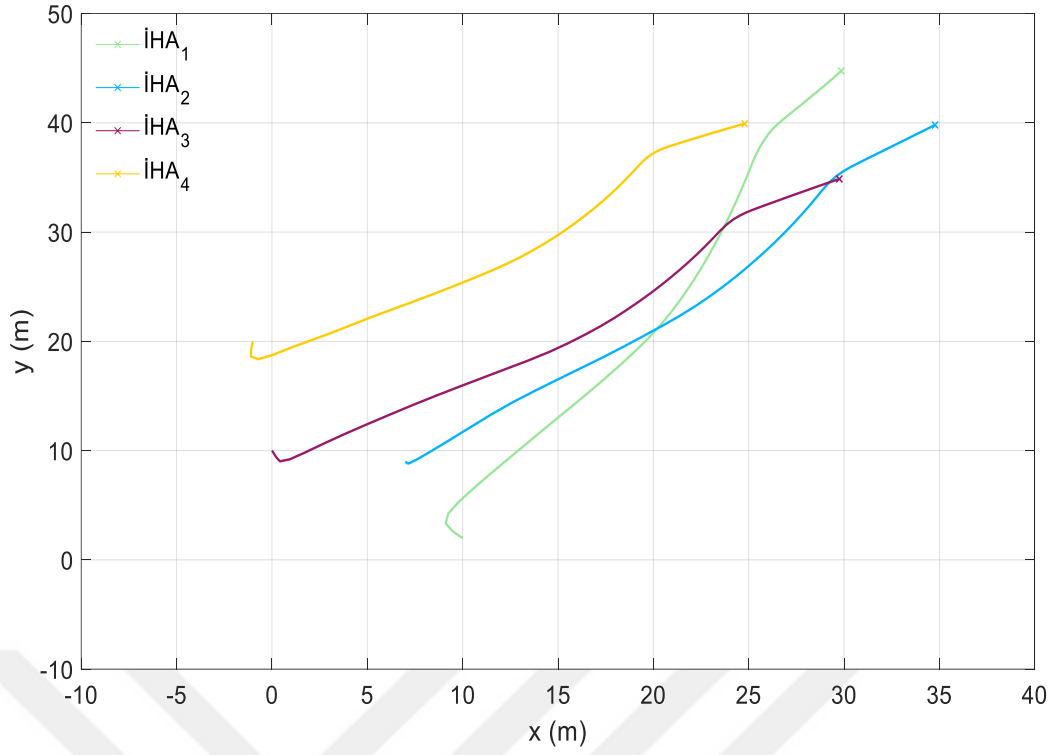
Şekil 10. İHA'ların üçgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri



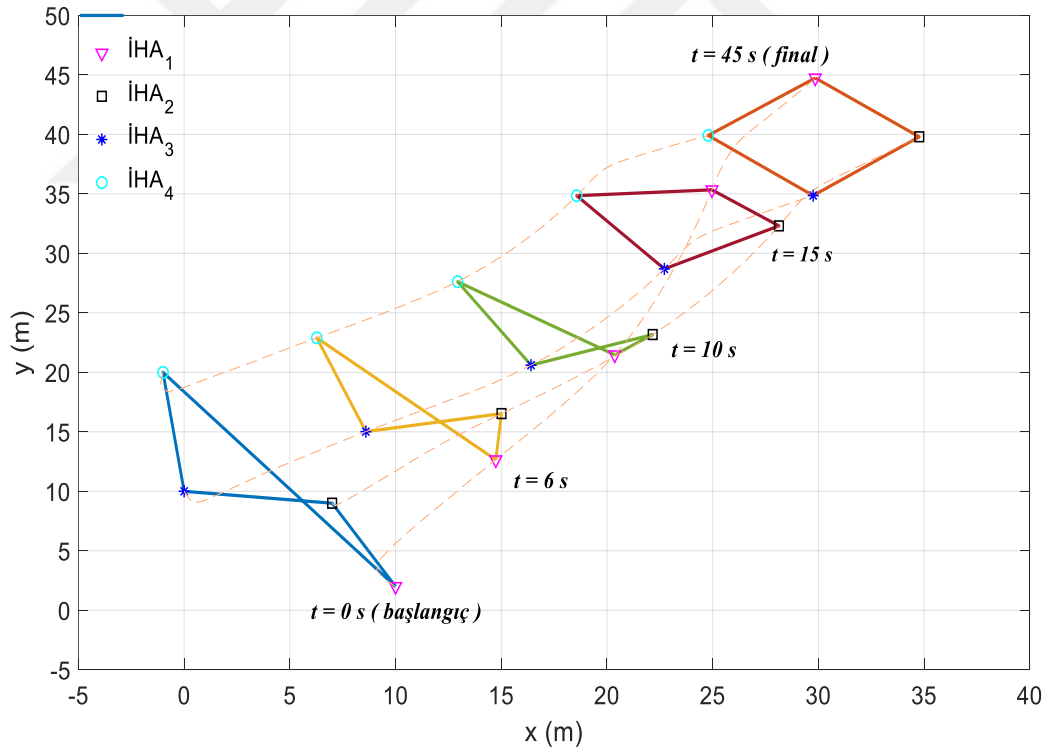
Şekil 11. İHA'lar arasında üçgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

Şekil 12’de İHA’ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri sunulmuştur. Bu uçuş için İHA’lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} 10 & 7 & 0 & -1 \\ 2 & 9 & 10 & 20 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. Şekilden görüleceği üzere, İHA₁’in formasyon hareketine başladığı anda x ekseninde yaklaşık 1 metre ters yönde hareket ettiği ardından, x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ederek $x = 30$ ve $y = 45$. metrede formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. İHA₂’nin formasyon oluşumu için yörünge hareketleri incelendiğinde; üçgen formasyonunu oluşturmak için x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ettiği ve yaklaşık olarak $x = 35$ ve $y = 40$. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₃’ün yörünge hareketi incelendiğinde, başlangıç anında ters y ekseninde hareket ettiği devamında, x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık olarak $x = 30$ ve $y = 35$. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Son olarak, İHA₄’ün başlangıç anında y ekseninde ters yönde hareket ettiği ardından, x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ederek $x = 25$ ve $y = 40$. metrede formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 13’te İHA’ların GKTFK algoritması için 0 (başlangıç), 6, 10, 15 ve 45. (final) saniyelerdeki formasyon oluşum adımları sunulmuştur. Başlangıç anında İHA’ların dağınık bir şekilde konumlandıkları görülmektedir. İHA’ların 6. saniyede, üçgen formasyonunu oluşturabilmek için uygun komşuluk düzenini sağlamaya çalıştıkları, 10. saniyede ise İHA₁’in İHA₂ ve İHA₃’ün arasında konumlandığı ve devamında ise, 15. saniyede eşkenar dörtgen formasyonunu oluşturmak için İHA’ların uygun komşuluk dizilişine geldikleri gözlemlenmiştir. Son adım olan 45. saniyede ise İHA’ların arzu edilen eşkenar formasyon düzenini başarılı bir şekilde oluşturdukları görülmektedir.



Şekil 12. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 13. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 14'te İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu süresince sahip oldukları yörünge ve lineer hız bilgileri sunulmuştur. İHA₁'in x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan 10. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ve 2. saniyeye kadar x ekseninde ters yönde hareket ettiği sonrasında ise, 30. saniyede yaklaşık 35. metreye ulaştığı görülmüştür. Devamında, İHA'nın 45. saniyede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, başlangıç anından 2. saniyeye kadar hız değerinin -1 m/s değerine ve ardından, İHA'nın x ekseninde ileri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin artarak 1.5 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, ilgili İHA'nın hız değerinin 9. saniyeden itibaren azalarak formasyon sonunda sıfıra gerilediği ve böylece sürüdeki diğer İHA'lar ile birlikte fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₁'in y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 2. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ve 15. saniyede yaklaşık 37. metreye ulaştığı ve y eksenini boyunca ileri yönde hareketine devam ederek yaklaşık olarak 45. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, formasyon hareketine başladığı anda hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2.4 m/s değerine ulaştığı ve ardından, İHA'nın 15. saniyeye kadar hız değerini bu seviyede koruduğu devamında ise, hız değerinin azalarak yaklaşık 35. saniyeden itibaren sıfır değerine gerilediği gözlemlenmiştir.

Şekil 14'te İHA₂'nin x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -7. metreden harekete başladığı ve devamında, x eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek 30. saniyede yaklaşık olarak 33. metreye ulaştığı görülmektedir. Ardından, İHA'nın hareketine devam ederek 45. saniyede arzu edilen formasyonu tamamladığı görülmektedir. Ayrıca, İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, ilk 1 saniyede x ekseninde çok az hareket etmesinden dolayı hız değerinin oldukça küçük genlikte olduğu ve devamında, ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket etmesinden dolayı hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2.1 m/s değerine ulaştığı görülmektedir. Sonrasında, İHA'nın hız değerinin azalmaya başladığı ve 35. saniyeden itibaren sıfır değerine gerileyerek sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, İHA₂'nin y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 9. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ve ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 32. metreye ulaştığı görülmektedir. Ardından, İHA'nın arzu edilen formasyon konumuna varmak için y eksenini boyunca ileri yönde hareketine devam ettiği ve 45. saniyede formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, 1. saniyeye kadar geçen sürede hız değerinin -0.2 m/s değerine gerilemesine karşın devamında,

hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık 2.15 m/s değerine ulaştığı ve ardından, 15. saniyede 1.5 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın hız değerinin azaldığı ve arzu edilen formasyon konumuna yaklaştıkça hız değerinin 35. saniyeden itibaren sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 14'te İHA₃'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan 0. metreden harekete başladığı ve ardından, x eksenı boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 23. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, 30. saniyeden itibaren İHA₁ ile aynı eksenı hareket etmeye başladığı ve böylece her iki İHA'nın da arzu edilen formasyon konumlarına ulaştıkları görülmüştür. Ayrıca, İHA₃'ün x eksenındaki hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anından itibaren ileri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2.2 m/s değerine ulaştığı ve devamında ise, hız değerini 10. saniyeye kadar koruduğu gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'nın hız değerinin azalmaya başladığı ve 15. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği ve 35. saniyede sıfır değerine yakınsayarak sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 10. metrede formasyon hareketine başladığı ve 2. saniyeye kadar ilgili eksenı ters yönde hareket ettiği sonrasında ise ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 30. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın arzu edilen formasyon konumuna ilerlediği ve 45. saniyede yaklaşık 35. metreye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, İHA₃'ün y eksenındaki hız verileri incelendiğinde, İHA'nın ilk 2 saniyedeki ters yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin 2. saniyede yaklaşık -1 m/s değerinde olduğu ve devamında, İHA'nın ileri yönlü hareketi sonucunda hız değerinin de artarak 15. saniyede yaklaşık 1.6 m/s değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın hız değerinin 15. saniyeden itibaren azalış gösterdiği ve 30. saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsayarak sürü ile hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları görülmüştür.

Şekil 14'te İHA₄'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı ve 2 saniye boyunca ters yönde hareket ettiği devamında ise, x eksenı boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 20. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, İHA'nın ilgili eksen boyunca hareketine devam ettiği ve 45. saniyede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın x eksenındaki hız verileri incelendiğinde, 2. saniyede yaklaşık -0.1 m/s değerinde olduğu ardından, İHA'nın ileri yöndeki hareketine bağlı olarak hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın hız değerini 8. saniyeye kadar koruduğu ve devamında, hız değerinin azalarak 15. saniyede yaklaşık 0.8 m/s

değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, ilgili İHA'nın hız değerinin 33. saniyeden itibaren sıfır değerine gerilediği ve böylece, sürüdeki diğer İHA'lar ile hızları üzerinde fikir birliği sağlayarak başarılı bir formasyon gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₄'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 20. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ve 3. saniyeye kadar ilgili eksen boyunca ters yönde hareket ettiği ardından, formasyon konumuna ulaşmak için eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 38. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA'nın 30. saniyeden itibaren İHA₂ ile aynı eksen boyunca hareket etmeye başladığı ve devamında, 45. saniyede yaklaşık 40. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, 3. saniyede hız değerinin -1.2 m/s değerinde olduğu ve eksen boyunca ileri yöndeki hareketine bağlı olarak hız değerinin 5. saniyede yaklaşık 1.25 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın hız değerini 15. saniyeye kadar koruduğu ve devamında, hız değerinin azalarak 33. saniyeden itibaren sıfır değerine gerilediği görülmüştür. Böylece, İHA₄ diğer İHA'lar ile birlikte hızları üzerinde fikir birliği sağlayarak arzu edilen eşkenar dörtgen formasyon düzenini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir.

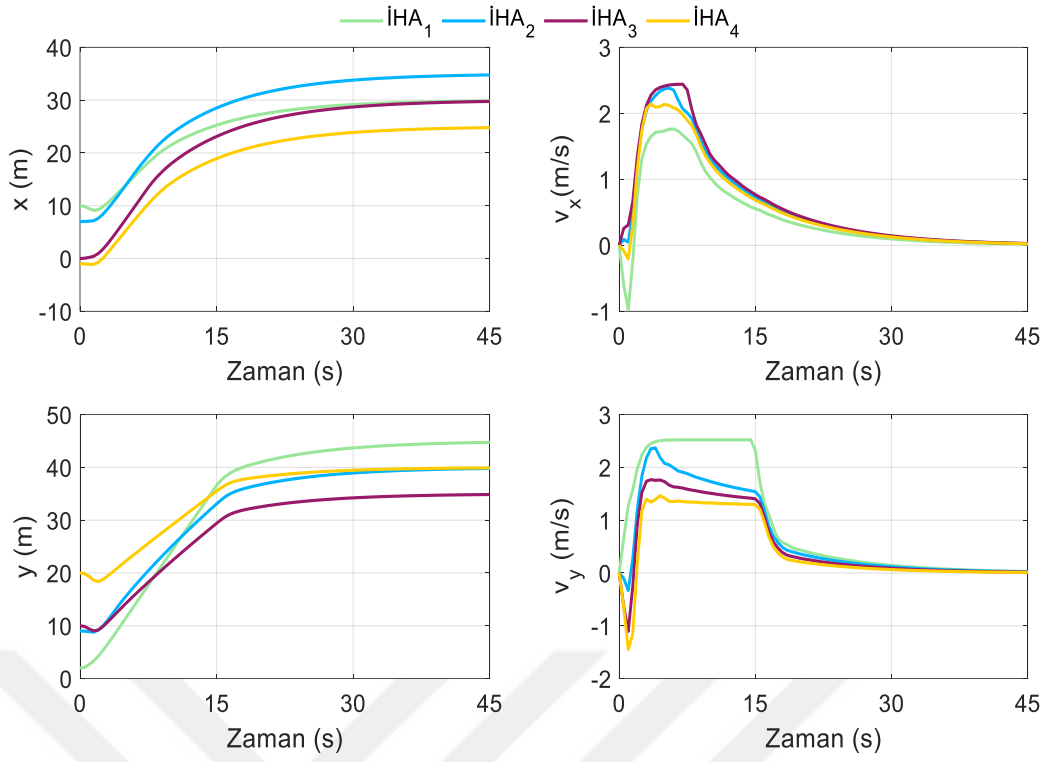
Şekil 15'te İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen hata değerleri İHA'ların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'ların başlangıç anında hız değerlerinin sıfır olması nedeni ile hata değerinin artarak 2. saniyede yaklaşık 2.9 m/s değerine yükseldiği ve devamında, her iki İHA'nın da hız değerinin artmasıyla hata değerinin azalarak 5. saniyede yaklaşık 0.8 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Sonrasında, Şekil 14'te sunulan hız verilerinden de görüleceği üzere, y ekseninde İHA₁ ile İHA₂ arasındaki hız farkının 5 ile 15. saniyeler arasında artması nedeni ile, hata değerinin de tekrar artış göstererek yaklaşık 1 m/s değerine yükseldiği ve 16. saniyeden itibaren hız değerlerinin aynı genliğe ulaşmaları nedeni ile hata değerinin de azalarak 35. saniyede sıfıra yakınsadığı görülmüştür.

Şekil 15'te turuncu renk ile gösterilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 14'te sunulan ilgili İHA'lara ait hız verileri incelendiğinde, x ekseninde formasyon başlangıç anından itibaren hız değerlerinin yaklaşık olarak aynı genlik ve formda olduğu ancak, y ekseninde 5 ile 15. saniyeler arasında İHA'ların hızları üzerinde fikir birliği sağlayamamaları nedeniyle hata meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, İHA'lar arasındaki konsensüs hata normunun 2. saniyede 0.7

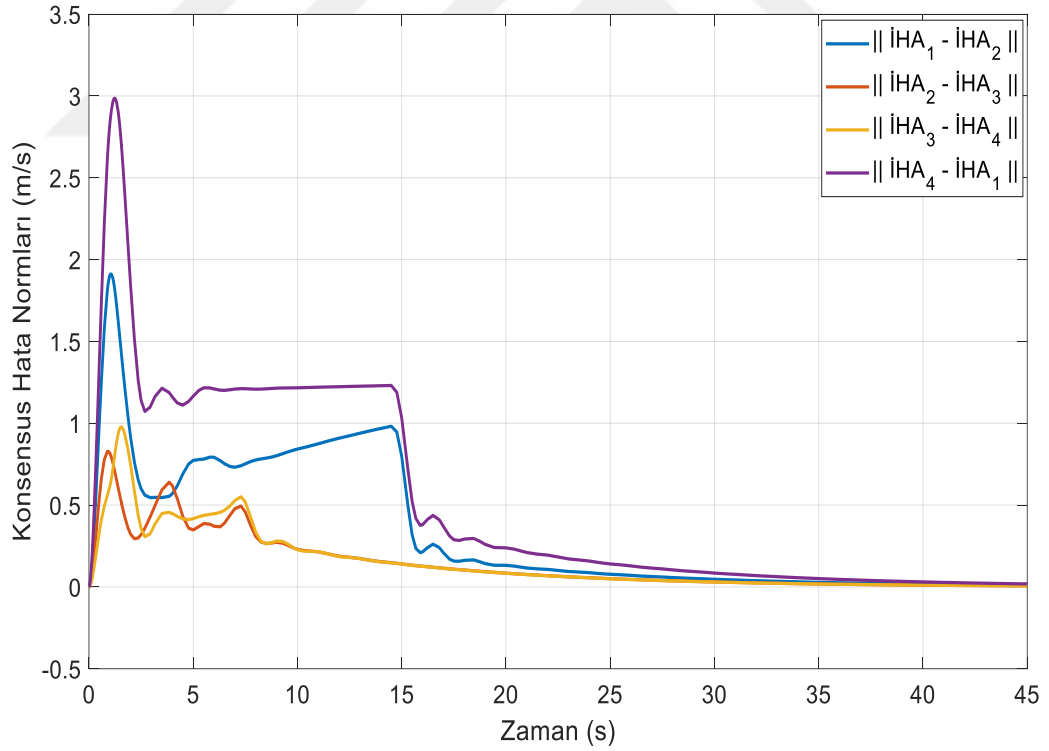
m/s değerinde olduğu devamında, hata değerinin küçük dalgalanmalar ile birlikte azalarak 35. Saniyede sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 15'te sarı renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 14'te sunulan ilgili İHA'lara ait hız verileri incelendiğinde, formasyon hareketi başlangıcından itibaren aynı yönde hız değeri üretmelerine rağmen, farklı büyüklüklerde hız değerine sahip oldukları görölmektedir. Bu sebeple, hata değerinin formasyon başlangıç anından itibaren artarak 2.5'inci saniyede yaklaşık 0.9 m/s değerinde olduğu devamında ise, azalarak 5. saniyede 0.5 m/s değerinin altına gerilediği gözlemlenmiştir. Ancak, 5 ile 15. saniyeler arasında ilgili İHA'lar arasında y ekseninde hız değerlerinin genlikleri birbirlerinden farklı olması nedeni ile, hata değeri tekrar 0.5 m/s değerinin üzerine çıksa da, devamında İHA'ların 15. saniyeden itibaren hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları görölmüş ve hatanın 35. saniyeden itibaren sıfıra yakınsayarak İHA'ların başarılı bir formasyon gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 15'te mor renk ile gösterilen eğri İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 14'te sunulan ilgili İHA'lara ait hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıcından itibaren İHA'ların her iki eksen boyunca farklı büyüklükte hızlara sahip olduğu bu sebeple, konsensüs hata normlarının da artarak 2. saniyede yaklaşık 3 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, ilgili İHA'lar arasındaki hız farkının x ekseninde azaldığı bu sebeple, hata değerinin de azalarak 3. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği, ancak y ekseninde hata değerinin 15. saniyeye kadar sabit kalması nedeni ile konsensüs hatasının da 15. saniyeye kadar yaklaşık 1 m/s değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'lar arasındaki hata değerinin 15. saniyeden itibaren azalarak 35. saniyede sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiş ve böylece ilgili İHA'lar arasında hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları görölmüştür.



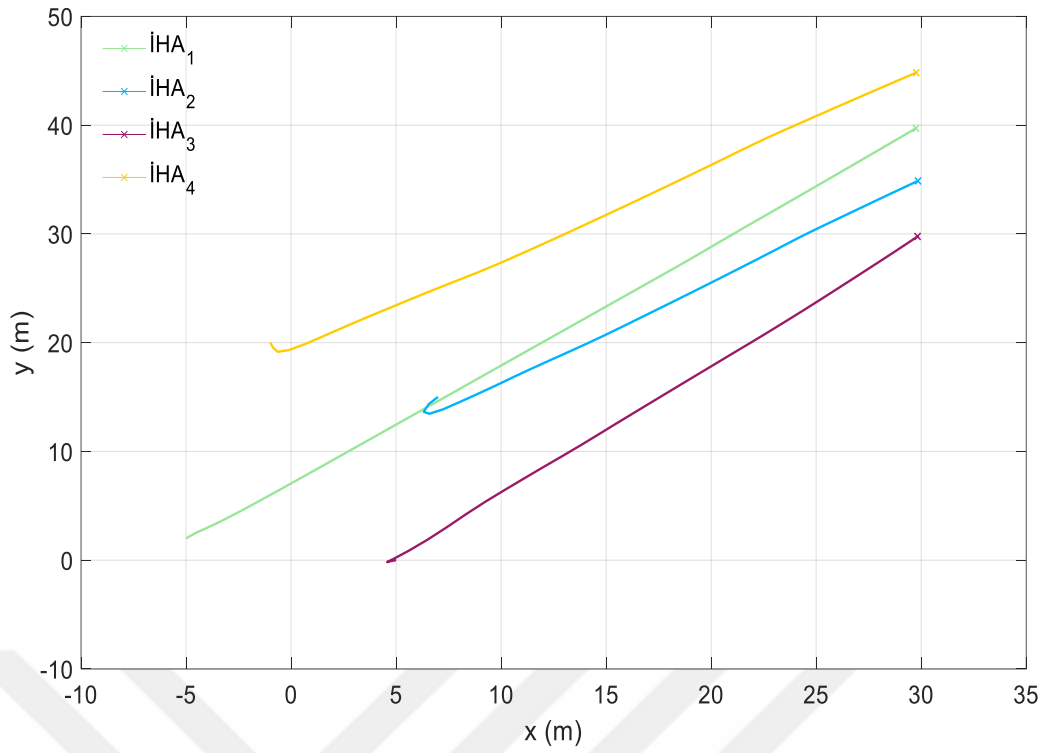
Şekil 14. İHA'ların eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri



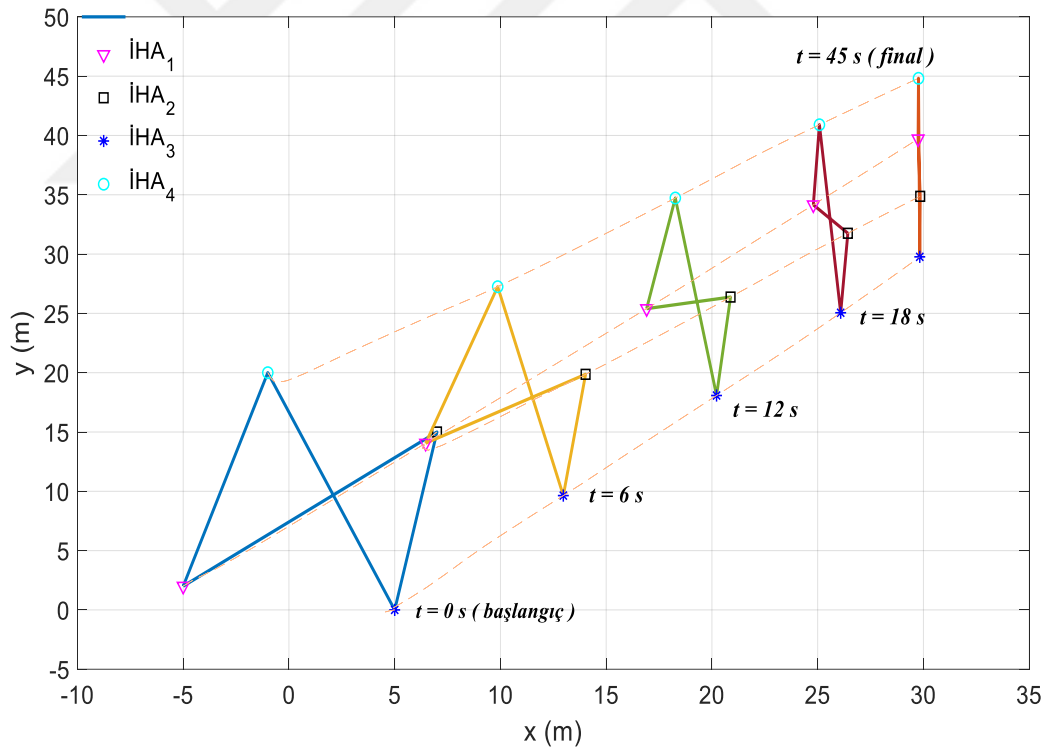
Şekil 15. İHA'lar arasında eşkenar dörtgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

Şekil 16'da İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri verilmiştir. Bu formasyon için İHA'lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} -5 & 7 & 5 & -1 \\ 2 & 15 & 0 & 20 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, İHA₁'in formasyon hareketine başladığı andan itibaren x ve y eksenleri boyunca ileri yönde doğrusal bir yörünge izleyerek $x = 30$; $y = 40$. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. İHA₂'nin formasyon oluşumu sırasında yörünge hareketleri incelendiğinde; formasyon hareketine başladıktan sonra x ve y eksenlerinde yaklaşık 1'er metre ters yönde hareket ettiği devamında, hat formasyonunu oluşturmak için x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık $x = 30$; $y = 35$. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₃'ün yörünge hareketi incelendiğinde, başlangıç anında x ekseninde bir miktar ters yönde hareket ettiği devamında ise, x ve y eksenleri boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık $x = 30$; $y = 30$. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₄'ün başlangıç anında y ekseninde yaklaşık 1 metre ters yönde hareket ettiği ardından, x ve y eksenleri boyunca ileri yönde doğrusal bir yörünge izleyerek $x = 30$; $y = 45$. metrede formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 17'de İHA'ların GKTFK algoritması için 0 (başlangıç), 6, 12, 18 ve 45. (final) saniyelerindeki hat formasyon oluşum adımları sunulmuştur. İlk olarak, başlangıç konumları itibari ile Şekil 7'de İHA'ların önceden tanımlı komşulukları referans alındığında, birbirlerine göre zigzag formunda konumlandıkları görülmektedir. 6. saniyede ise, İHA'ların hat formasyonu oluşturabilmek için uygun komşuluk düzenini sağlamaya çalıştıkları ve devamında, 12. saniyede İHA'ların birbirlerine daha yakın konuma gelerek zigzag şeklinde konumlanmaya devam ettikleri görülmektedir. Daha sonra, 18. saniyedeki formasyon adımı İHA'ların hat düzenini uygun komşuluk düzeni altında oluşturmaya başladıkları görülmüş ve son adım olan 45. saniyede ise İHA'ların başarılı bir şekilde hat formasyonunu oluşturdıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 16. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 17. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 18’de İHA’ların hat formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve lineer hız bilgileri sunulmuştur. İHA₁’in x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan -5. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı devamında, ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 23. metreye ulaştığı ve ardından, 28. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA’lar ile birlikte aynı ekseninde hareket ederek 30. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, ilgili İHA’nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anından itibaren artarak 5. saniyede yaklaşık 2.2 m/s değerine yükseldiği devamında ise, 7. saniyede 2.3 m/s değerine ulaştığı görülmüştür. Ardından, ilgili İHA’nın hız değerinin azaldığı ve 15. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği ve devamında ise, hız değerinin azalarak 35. saniyede yaklaşık sıfır değerine gerileyerek sürüdeki diğer İHA’lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ilgili İHA’nın y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 2. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ardından, ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede 32. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA’nın ileri yönde hareketine devam ettiği ve 40. metrede arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA’nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, hız değerinin artarak 5. saniyede 2.5 m/s değerine ulaştığı ardından, İHA’nın hız değerini 12. saniyeye kadar koruduğu görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA’nın hız değerinin azaldığı devamında, 15. saniyede 1 m/s değerine gerilediği ve ardından, hız değerinin 35. saniyede sıfır değerine gerileyerek sürüdeki diğer İHA’lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 18’de İHA₂’nin x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı, ilk 2 saniye boyunca ters yönde hareket ettiği ve devamında ise, x eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 20. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, İHA’nın ilgili eksen boyunca hareketine devam ettiği ve 45. saniyede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA’nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, 2. saniyede -0.8 m/s değerine gerilediği ardından, İHA’nın ileri yöndeki hareketine bağlı olarak 5. saniyede hız değerinin yaklaşık 1.5 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, hız değerinin 13. saniyede 1.2 m/s değerine gerilediği ve ardından, hız değerinin azalarak 35. saniyede sıfır değerine yakınsayarak sürüdeki diğer İHA’lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₂’nin y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 15. metreden formasyon hareketine başladığı, 2. saniyede 13. metreye gerilediği ve bu noktadan itibaren ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 30. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA’nın 45. saniyede 35. metreye ulaşarak arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA’nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, İHA’nın 2.

saniyeye kadar olan geri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin yaklaşık -0.9 m/s olduğu, İHA'nın ilgili eksen boyunca ileri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin artarak 13. saniyede yaklaşık 1.35 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın hız değerinin azalarak 35. saniyede sıfıra yakınsadığı ve böylece, sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 18'de İHA₃'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı, ilk 2 saniye boyunca ters yönde hareket ettiği ve devamında ise, x eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık 25. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile aynı ekseninde hareket ederek 45. saniyede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, ilk 2 saniyedeki geri yönlü hareketine bağlı olarak hız değerinin 2. saniyede -0.5 m/s değerinde olduğu ardından ilgili eksen boyunca ileri yönde hareketine bağlı olarak hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık 1.6 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın hız değerinin azalarak 13. saniyede yaklaşık 1.35 m/s değerine gerilediği ve sonrasında, azalışın devam ederek yaklaşık 34. saniyede sıfır değerine gerileyerek diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₃'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 0. metreden formasyon hareketine başladığı, ilk 2 saniye boyunca her ne kadar ters yönde hareket etse de devamında ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 22. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın eksen boyunca sürüdeki diğer İHA'lar ile komşuluk bilgilerini kullanarak 45. saniyede 30. metreye ulaşarak arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, 2. saniyede yaklaşık -0.15 m/s değerinde olduğu ardından ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket ettiğinden hız değerinin de artarak 5. saniyede yaklaşık 2.3 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Devamında ise, İHA'nın hız değerinin azalarak 15. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği ve İHA'nın formasyon konumuna yaklaşması nedeni ile hız değerinin azalarak 35. saniyede sıfır değerine gerilediği görülmüştür.

Şekil 18'de İHA₄'ün x eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyon başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı ve ileri yönde hareket ederek 15. saniyede yaklaşık 24. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın 30. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile aynı doğrultuda hareket ettiği ve her birinin 30. metrede arzu edilen formasyon konumlarına başarıyla ulaştıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anından itibaren İHA'nın hızının artarak 6. saniyede yaklaşık 2.5 m/s değerine yükseldiği ve devamında, hız

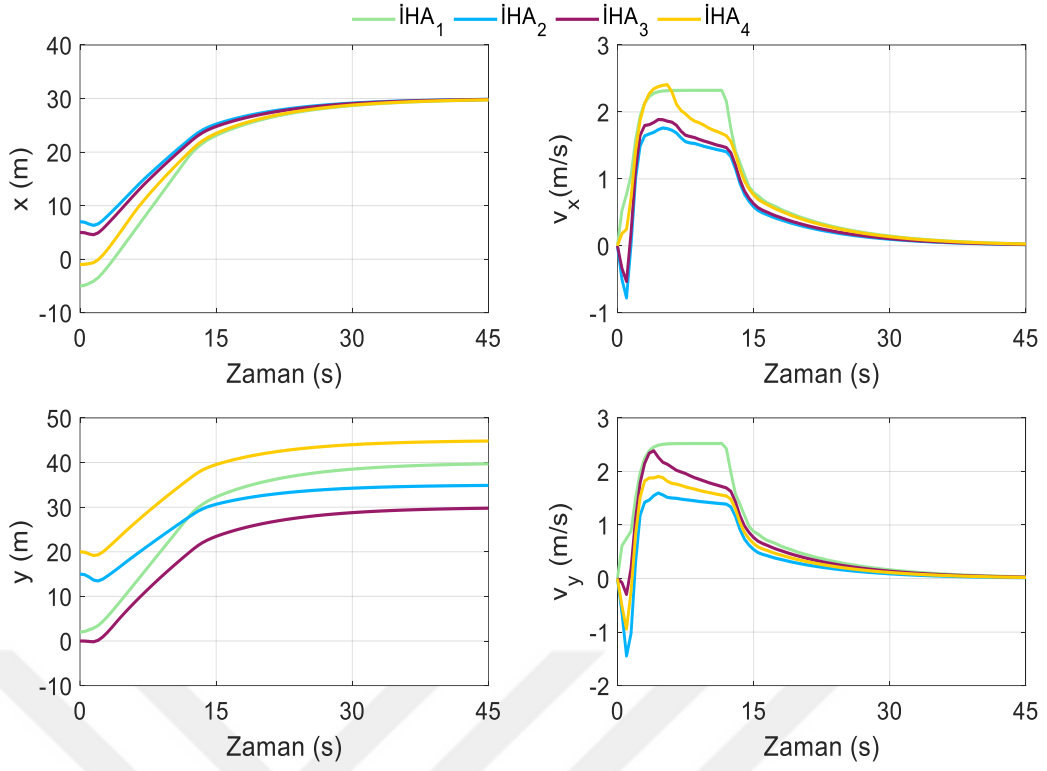
değerinin azalarak 13. saniyede yaklaşık 1.65 m/s değerine gerilediği görülmüştür. Daha sonra, x eksenı boyunca arzu edilen formasyon konumuna yaklaşması ile hız değerinin azalarak 15. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği ve devamında, 33. saniyeden itibaren sıfıra yakınsayarak sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₄'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, 20. metreden formasyon hareketine başladığı, 2. saniyeye kadar ilgili eksen boyunca ters yönde hareket ettiği ve ardından, y eksenı boyunca ileri yönde hareket ederek 45. saniyede yaklaşık 45. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki yörünge hız verileri incelendiğinde, İHA'nın ilk saniyelerdeki ters yöndeki hareketine bağlı olarak 2. saniyede hız değerinin yaklaşık -1 m/s değerinde olduğu ve devamında, ilgili eksen boyunca ileri yönde hareket etmesiyle hız değerinin artarak 5. saniyede yaklaşık 1.9 m/s değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'nın hız değerinin azalarak 15. saniyede yaklaşık 0.9 m/s değerine gerilediği ve devamında, hız değerinin formasyon hatasının azalmasıyla birlikte 35. saniyede sıfıra yakınsadığı ve böylece, İHA'nın sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak arzu edilen formasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 19'da İHA'ların hat formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen hata değerleri İHA'ların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 18'de ilgili İHA'lara ait hız değerleri incelendiğinde, 2. saniyeye kadar hata değerinin arttığı bu sebeple, 2. saniyede 2.6 m/s değerine ulaşıldığı görülmüştür. Ardından, İHA₂'nin hız değerinin hızla artması nedeni ile hata değerinin azaldığı ve 3. saniyede yaklaşık 0.9 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, her ne kadar y ekseninde ilgili İHA'ların hızları arasındaki hata değeri sabit olsa da, x eksenindeki hızları arasındaki farkın arttığı, bu sebeple hata oranının da tekrar artarak 12. saniyede yaklaşık 1.5 m/s değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ilgili İHA'ların 15. saniyeden itibaren hız değerlerinin hemen hemen aynı genlik ve forma geldiği ve devamında, 35. saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsadığı görülmüş ve böylece, İHA'ların hızları üzerinde fikir birliği sağlayarak arzu edilen formasyon düzenine geldikleri gözlemlenmiştir.

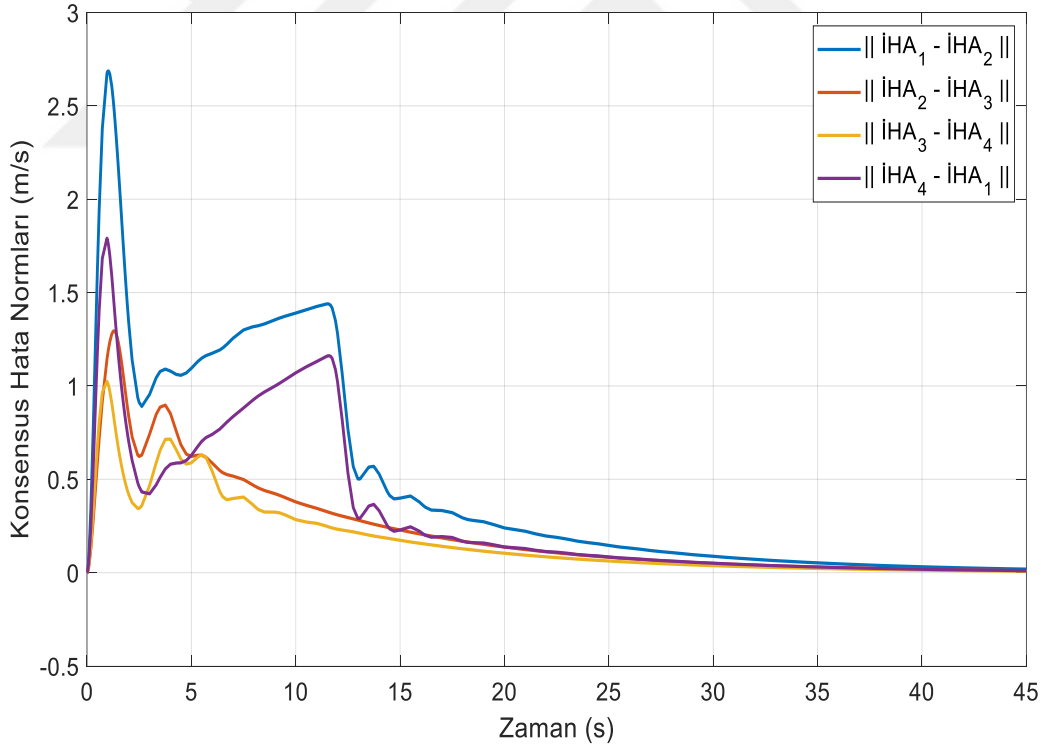
Şekil 19'da mavi renk ile gösterilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 18'de sunulan ilgili İHA'lara ait hız verileri incelendiğinde, x ekseninde her ne kadar aynı genlik ve formda hız değerine sahip olsalar da, y ekseninde 2. saniyeye kadar yaklaşık 1.2 m/s'lik bir hata değerine sahip oldukları

görülmektedir. Devamında, 3. saniyeden itibaren İHA₂'nin hız değeri artış göstermiş ve hata değeri azalsa da, İHA₃'ün y ekseninde hız değerinin artış göstermesi nedeni ile, hata değerinin 3 ile 5. saniyeler arasında tekrar artış gösterdiği ve sonrasında, İHA₃'ün hızının azalmasıyla hata değerinin tekrar azalarak 10. saniyede yaklaşık 0.5 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'ların 15. saniyeden itibaren aynı genlik ve formda hız değerine sahip oldukları ve 35. saniyeden itibaren hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 19'da sarı renk ile verilen eğri İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 18'de sunulan ilgili İHA'lara ait hız verileri incelendiğinde, 2. saniyeye kadar y ekseninde ters yönde hareket etmelerinden kaynaklı olarak hata değerinin artarak yaklaşık 1.7 m/s değerine yükseldiği devamında ise, 2 ile 3. saniyeler arasında İHA'ların ürettikleri hız değerlerinin birbirlerine yakın olması nedeni ile, hata değerinin de gerileyerek 0.5 m/s değerinin altına indiği gözlemlenmiştir. Daha sonra, 5 ile 12. saniyeler arasında ilgili İHA'ların uygun formasyon konumuna gelebilmeleri için ürettikleri hız değerlerinin birbirlerinden farklı olması nedeni ile, hata değerinin de artarak 12. saniyede yaklaşık 1.2 m/s değerine yükseldiği ve ardından, 13. saniyeden itibaren İHA'ların hızları arasındaki farkın azaldığı gözlemlenmiştir. Devamında, 15. saniyeden itibaren ilgili İHA'ların uygun formasyon konumlarına gidebilmeleri için aynı genlik ve formda hız değerine sahip oldukları görülmüş ve 35. saniyeden itibaren hızları üzerinde fikir birliği sağlayarak hat formasyonu için arzu edilen konumlarına ulaştıkları gözlemlenmiştir.



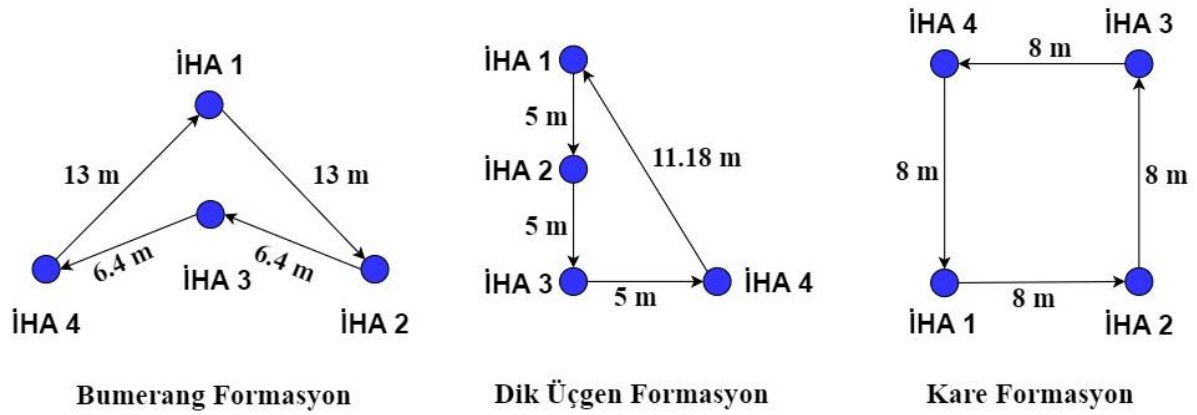
Şekil 18. İHA'ların hat formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri



Şekil 19. İHA'lar arasında hat formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

AGKTFK yöntemine ait simülasyon sonuçları

Şekil 20’de AGKTFK yöntemi için İHA’ların simülasyon ortamında gerçekleştirdikleri referans formasyon şekilleri sunulmuştur. İlk formasyon şekli olan bumerang formasyonu için İHA₁ ile İHA₂ ve İHA₁ ile İHA₄ arası mesafe 13 metre; İHA₂ ile İHA₃ ve İHA₃ ile İHA₄ arası mesafe 6.4 metre; İHA₁ ile İHA₃ arası mesafe 8 metre ve İHA₂ ile İHA₄ arası mesafe ise 10 metre olarak alınmıştır. İkinci formasyon şekli olan dik üçgen formasyonunda ise, İHA₁ ile İHA₂, İHA₂ ile İHA₃ ve İHA₃ ile İHA₄ arası mesafe 5 metre; İHA₁ ile İHA₃ arası mesafe ise 10 metre olarak alınmıştır. Son formasyon şekli olan kare formasyonunda ise; İHA₁ ile İHA₂, İHA₂ ile İHA₃, İHA₃ ile İHA₄ ve İHA₁ ile İHA₄ arası mesafeler 8 metre olarak alınmıştır.



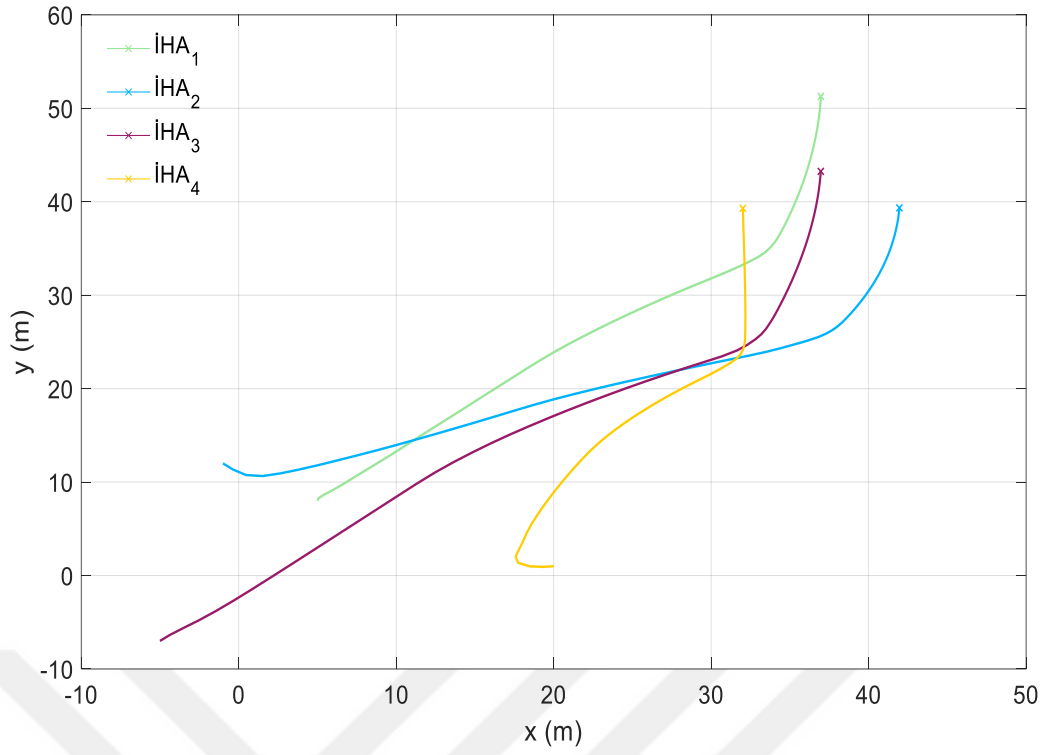
Şekil 20. İHA’ların AGKTFK için simülasyon çalışmalarında gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri

Şekil 21’de İHA’ların bumerang formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri sunulmuştur. Bu formasyon için İHA’lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} 5 & -1 & -5 & 20 \\ 8 & 12 & -7 & 1 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. Şekilden İHA₁’in başlangıç konumundan itibaren sürü içerisinde bulunan diğer İHA’lar ile bilgi paylaşımını sağlayarak arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₂’nin formasyon oluşumu sırasında yörünge hareketleri incelendiğinde; bumerang formasyonunu oluşturmak için özellikle x eksen yönünde hareket ettiği ve yaklaşık 42. metreden itibaren y eksen boyunca hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, İHA₃ mesafe olarak formasyon oluşum noktasına en uzak olan İHA’dır. Ancak, önerilen AGKTFK algoritması ile İHA’nın hızla arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmüştür. Son olarak, İHA₄’ün formasyon oluşumu sırasında yörünge hareketleri incelendiğinde; bumerang formasyonu için harekete başladığında x ekseninde ters yönde hareket ettiği devamında ise, x ekseninde 30; y ekseninde 20. metreye kadar uçuşunu

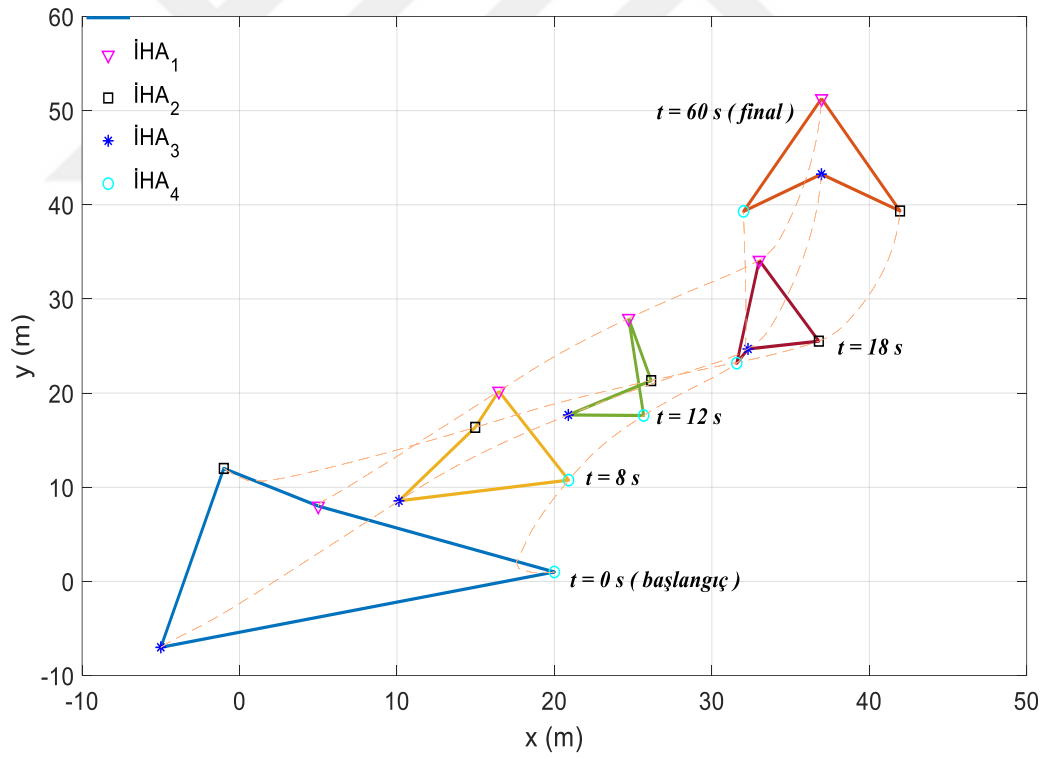
sürdüğü ve sonrasında arzu edilen formasyon konumuna gitmek için y eksenı boyunca hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı görülmüştür.

Şekil 22’de İHA’ların AGKTFK algoritması için 0 (başlangıç), 8, 12, 18 ve 60. (final) saniyelerdeki formasyon oluşum adımları sunulmuştur. Başlangıç anında İHA’ların üçgen formunda oldukları görülmektedir. Devamında, İHA’ların hareketlenerek 8. saniyede daha küçük bir üçgen formunu aldıkları ve sonrasında, 12. saniyede arzu edilen formasyon düzenini oluşturmak için kendi aralarında x ve y eksenleri boyunca yer değiştirmeye başladıkları gözlemlenmiştir. İHA’ların 18. saniyedeki konumları incelendiğinde, araçların Şekil 20’de tanımlanmış olan doğru dizilime geldikleri ve formasyon konumlarına ulaşmak için konumlarını ayarladıkları gözlemlenmiştir. Son adım olan 60. saniyede ise İHA’ların bumerang formasyonunu başarılı bir şekilde oluşturdukları görülmüştür.





Şekil 21. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 22. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 23'te İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve lineer hız bilgileri sunulmuştur. İHA₁'in x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan 5. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve ilgili eksen boyunca hareketini ileri yönde devam ettirerek yaklaşık 20. saniyeden itibaren İHA₃ ile aynı eksen boyunca hareketine devam ettiği gözlemlenmiştir. İHA₁'in x eksenini boyunca sahip olduğu lineer hız bilgileri incelendiğinde ise, ilk saniyelerde yaklaşık 2 m/s değerine ulaştığı ve ardından, 18. saniyeden itibaren azalarak 20. saniyede yaklaşık 0.25 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA₁ ile İHA₃'ün yaklaşık 20. saniyeden itibaren lineer hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları görülmüştür. İHA₁'in y eksenindeki hareketi incelendiğinde ise; ilgili eksenindeki başlangıç noktası olan 8. metreden harekete başladığı ve ardından, y eksenini boyunca ilerleyerek yaklaşık 57. metrede arzu edilen formasyon noktasına ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, İHA₁'in y eksenindeki lineer hızı incelendiğinde, yaklaşık 2. saniyede 2 m/s genlik değerine ulaştığı, devamında ise azalarak yaklaşık 45. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile birlikte fikir birliği sağlayarak sıfır değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 23'te İHA₂'nin x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan -1. metreden harekete başladığı ve 20 saniye boyunca ileri yönde hareket ederek 20. saniyede yaklaşık 40. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, arzu edilen formasyon noktası olan 42. metrede formasyonu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki lineer hızı incelendiğinde, başlangıç anından itibaren hız değeri artarak yaklaşık 2. saniyede 2.5 m/s değerine ulaştığı ve yaklaşık olarak 18 saniye boyunca bu değeri koruduğu ardından hız değeri azalarak 20. saniyede yaklaşık 0.25 m/s değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın 20. saniyede İHA₁ ve İHA₃ ile fikir birliği sağladığı ve devamında ise, tüm sistemin yaklaşık olarak 45. saniyeden itibaren lineer hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları görülmüştür. İlgili İHA'nın y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde ise; başlangıç konumu olan 12. metreden harekete başladığı ve ardından, yaklaşık 40 saniye boyunca ilerleyerek İHA₄ ile aynı konuma geldikleri gözlemlenmiş ve bu iki İHA'nın da arzu edilen formasyon konumları olan yaklaşık 39. metrede formasyonu gerçekleştirdikleri görülmüştür. Ayrıca, İHA₂'nin y eksenindeki lineer hız verisi incelendiğinde; başlangıç anından yaklaşık 2 saniye boyunca ters yönde hareket ederek yaklaşık -1.2 m/s değerinde olduğu ve ardından, ileri yönde hareket ederek yaklaşık 5. saniyede 1 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'nın hız değeri artarak yaklaşık 1.2 m/s değerine ulaştığı, devamında ise hız değeri düşerek 45. saniyede tüm sürü ile fikir birliği sağladığı görülmüştür.

Şekil 23'te İHA₃'ün x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan -5. metreden harekete başladığı ve yaklaşık olarak 18 saniye boyunca ileri yönde hareket ederek 20. saniyede yaklaşık 35. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, ilgili İHA'nın yaklaşık 30. saniyede İHA₁ ile aynı doğrultuya geldikleri ve devamında, arzu edilen formasyon noktası olan yaklaşık 37. metrede formasyonu gerçekleştirdikleri görülmüştür. Ayrıca İHA'nın x eksenindeki lineer hızı incelendiğinde, başlangıç anından itibaren artarak yaklaşık 2. saniyede 2.4 m/s değerine ulaştığı ve ardından, İHA'nın bu değeri yaklaşık 18 saniye boyunca koruduğu, devamında ise özellikle 20. saniyeden itibaren İHA₁ ve İHA₂ ile fikir birliği sağladığı görülmüş ve 40. saniyeden itibaren hız değeri sıfıra yakınsamıştır. Bununla birlikte, İHA₃'ün y eksenini boyunca sahip olduğu yörünge bilgileri incelendiğinde ise, ilgili İHA'nın -7. metreden harekete başladığı ve devamında ise, arzu edilen formasyon konumu olan 44. metreye gelerek formasyonu tamamladığı görülmüştür. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenini boyunca sahip olduğu lineer hız bilgileri incelendiğinde, başlangıç anından itibaren artarak yaklaşık 2. saniyede 2.5 m/s değerine ulaştığı devamında ise, yaklaşık 10 saniye boyunca hız değerini koruduğu ve ardından azalarak yaklaşık 45. saniyede diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir.

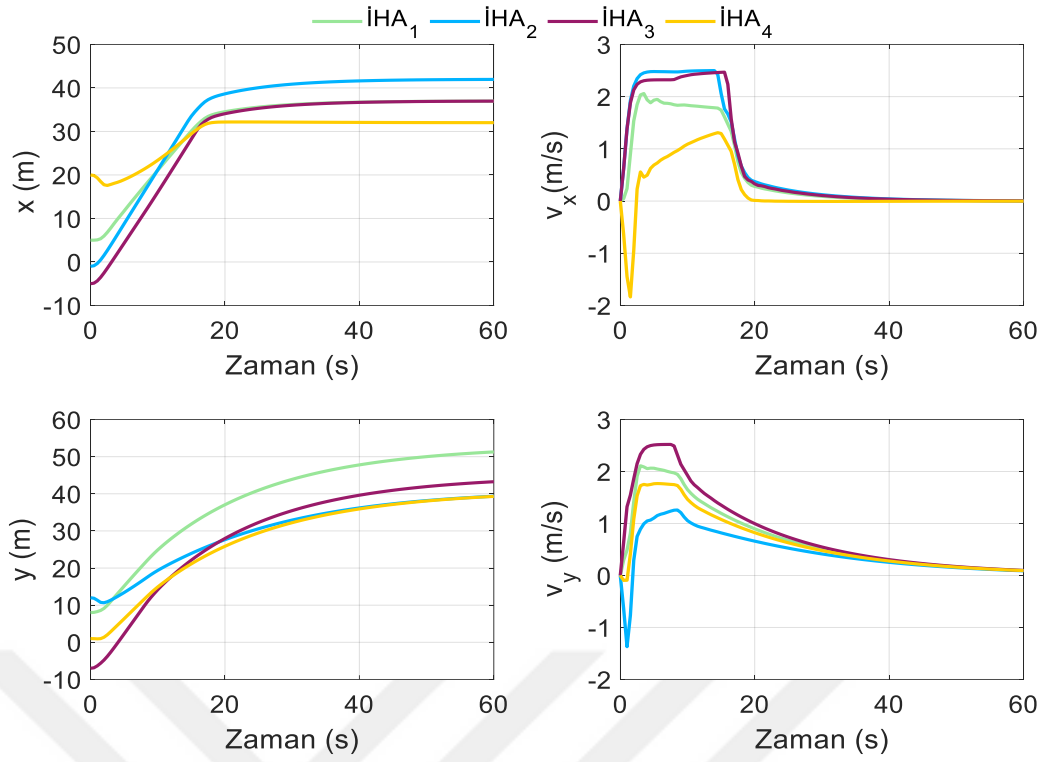
Şekil 23'te İHA₄'ün x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan 20. metreden harekete başladığı ve yaklaşık olarak 18 saniye boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık 32. metreye ulaştığı görülmüştür. Ardından, İHA'nın bu noktada kalarak arzu edilen formasyonu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki lineer hız bilgileri incelendiğinde, başlangıç anından yaklaşık 1.5 saniyeye kadar azalarak -1.8 m/s değerine ulaştığı, ardından 2. saniyede yaklaşık 0.4 m/s değerine geldiği ve 18 saniye boyunca hız değeri artarak yaklaşık 1.25 m/s değerine çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA₄'ün hızının 18 ile 20. saniyeler arasında azalarak yaklaşık 0.25 m/s değerine gerilediği, devamında ise yaklaşık 45. saniyede diğer İHA'lar ile hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₄'ün y eksenindeki yörünge bilgileri incelendiğinde ise, 1. metreden harekete başladığı ve devamında ise, y eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek yaklaşık 45. saniyede İHA₂ ile aynı konuma geldikleri görülmüş ve her iki İHA'nın 39. metrede arzu edilen formasyon konumlarına ulaştıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki lineer hız bilgileri incelendiğinde; İHA'nın başlangıç anında ters yönde çok az hareket etmesinden kaynaklı olarak -0.15 m/s değerine gerilediği ve devamında ise hız değeri, İHA'nın ileri yönde gitmesinden kaynaklı olarak yaklaşık 2. saniyede 1.7 m/s değerine ulaştığı görülmüştür. Son olarak, ilgili İHA'nın hız değerinin azalarak yaklaşık 45. saniyede sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 24'te İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen hata değerleri İHA'ların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'ların başlangıç anında hız değerlerinin sıfır olmasından dolayı hata değeri sıfırdır. Daha sonra formasyon uçuşunun başlamasından ve İHA'ların henüz hızları üzerinde fikir birliği sağlayamamalarından dolayı hata değeri artarak yaklaşık 2. saniyede 2.4 değerine çıkmıştır. Şekil 23'ten de görüleceği üzere, ilgili İHA'ların hız değerleri yaklaşık 45. saniyede aynı genliğe ulaştığı ve bu sebeple, hata değerinin de yaklaşık bu saniyede sıfır değerinde olduğu gözlemlenmiştir.

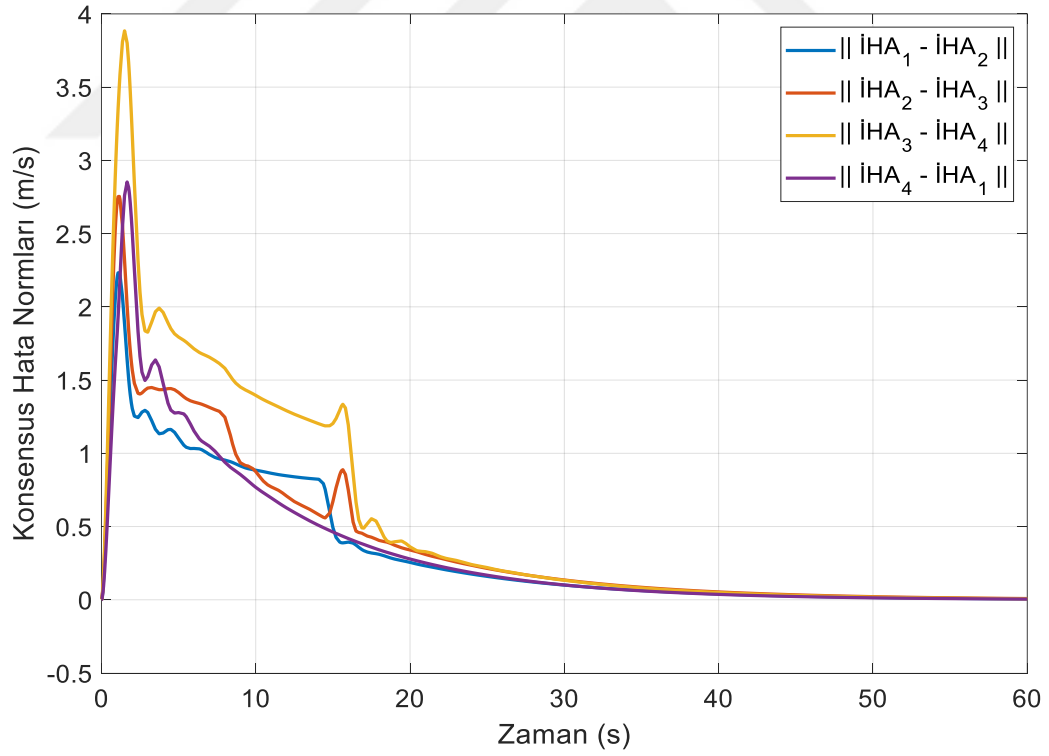
Şekilde 24'te turuncu renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. İHA'ların formasyon uçuşunun başlangıç anından 10. saniyeye kadar ki hata değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ardından, özellikle 20. saniyeden itibaren İHA'ların formasyon düzenini oluşturmaya başlamalarından sonra, İHA'lar arasındaki hata değerinin azaldığı ve 45. saniyeden itibaren sağlanan fikir birliği ile hata değerinin sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekilde 24'te sarı renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin formasyon uçuşunun başlangıç anından itibaren en yüksek olduğu görülmektedir. İHA'lar arasındaki hata değerinin yaklaşık 2. saniyede 3.8 değerine ulaştığı ve sonrasında İHA'lar arasındaki fikir birliğinin sağlanmasıyla hata değerinin yaklaşık 45. saniyede sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 24'te mor renk ile verilen eğri ise İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. İlgili İHA'lar arasındaki hata değeri incelendiğinde, başlangıç anından yaklaşık 2. saniyeye kadar hızla arttığı, devamında ise özellikle 20. saniyeye kadar İHA'lar arasındaki formasyonun belirli ölçüde sağlanması nedeni ile, hız değerlerinin birbirlerine yakınsadığı görülmüştür. Ardından, tüm sürünün yaklaşık 45. saniyeden itibaren hızları üzerinde fikir sağlanması nedeni ile, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 23. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri



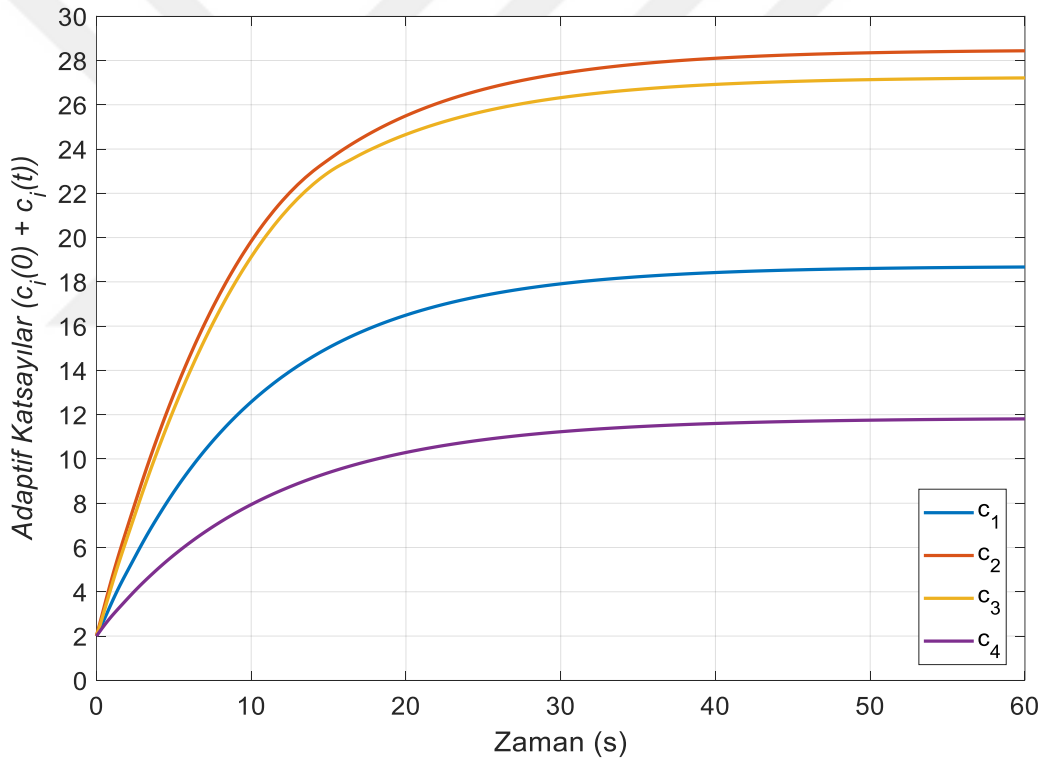
Şekil 24. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

Şekil 25'te İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimleri sunulmuştur. Ayrıca, AGKTFK algoritması için gerçekleştirilen tüm simülasyon çalışmaları boyunca adaptasyon parametrelerinin başlangıç değerleri $c_i(0) = 2, (i = 1, \dots, 4)$ olarak alınmış ve $c_i(t)$ değerleri denklem (35)'te sunulan denklem aracılığıyla hesaplanmıştır. İlk olarak, şekilde mavi ile verilen eğri c_1 parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 24'te sunulan formasyon hatalarının normu dikkate alınarak ilgili parametrenin zamanla değişimi incelendiğinde, başlangıç değeri olan 2'den itibaren arttığı ve 20. saniyeye kadar formasyon hatasının artmasından kaynaklı olarak c_1 parametresinin de meydana gelen hatayı kompanze etmek için değerinin yaklaşık 16'ya kadar arttığı görülmektedir. Ardından, 20. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin azalması nedeni ile, c_1 parametresindeki artış hızının yavaşladığı ve İHA'ların yaklaşık 45. saniyeden itibaren hızları üzerinde fikir birliği sağlanması nedeni ile c_1 parametresinin değerinin 18 etrafında sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekilde 25'te turuncu ile verilen eğri c_2 parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. İlgili parametrenin başlangıç değeri olan 2'den itibaren yükselerek yaklaşık 18 saniye boyunca hızla artış göstererek yaklaşık 25 değerine ulaştığı ve ardından, özellikle iki İHA arasındaki y eksenindeki mesafenin arzu edilen formasyon düzenine gelmesiyle parametre değerindeki artışın azaldığı görülmüştür. Daha sonra, yaklaşık 45. saniyeden itibaren İHA₂ ile İHA₃ arasında fikir birliğinin sağlanması nedeni ile parametre değeri yaklaşık 28.5 etrafında sabit kalmıştır.

Şekilde 25'te sarı ile verilen eğri c_3 parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 23 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasında (x ekseninde) başlangıç anında formasyon hatasının çok yüksek olması nedeni ile, c_3 parametresinin değerinin hızla artarak 18. saniyede yaklaşık 23 değerine yükseldiği ve ardından, formasyon hatasının azalmasıyla birlikte ilgili parametre değerindeki artış hızının da yavaşlayarak 30. saniyede yaklaşık 26.5 değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Son olarak, tüm sürünün yaklaşık 45. saniyede hızları üzerine sağladıkları fikir birliği ile ilgili parametre değerinin bu saniyeden itibaren yaklaşık 28 değerinde sabit kaldığı görülmüştür.

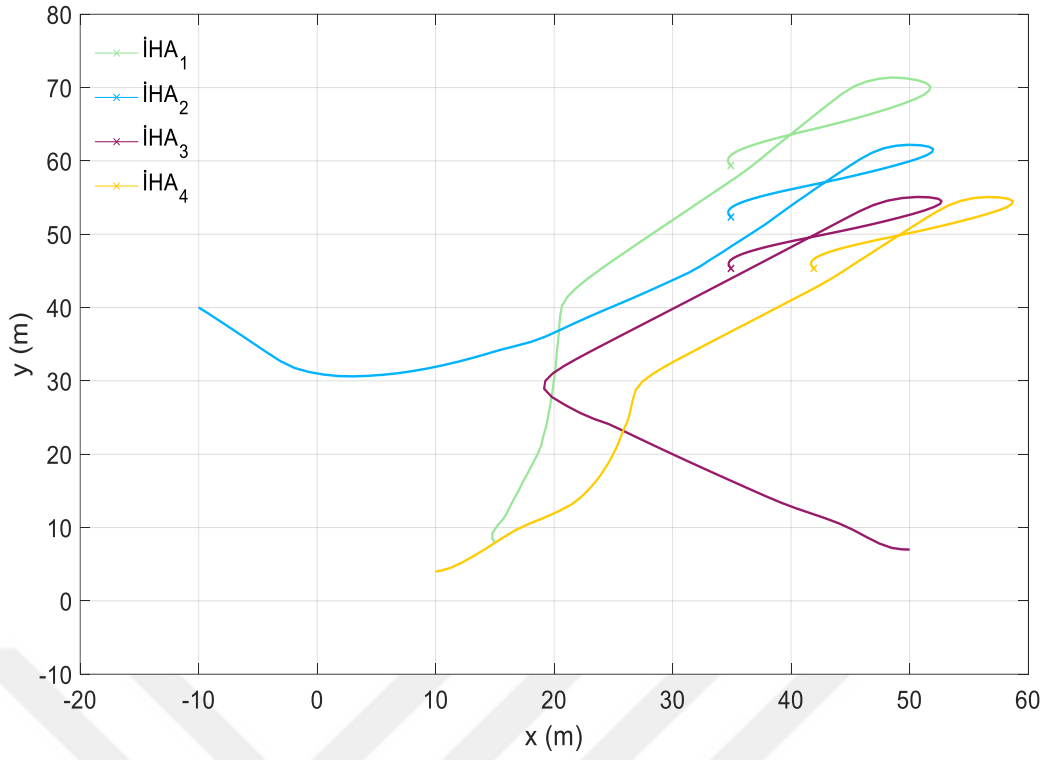
Şekilde 25’te mor ile verilen eğri c_4 parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 24’te sunulan ilgili İHA’lar arasındaki formasyon hatası incelendiğinde, başlangıç anında hem x hem de y eksenı boyunca İHA’ların birbirlerine yakın konumda olmaları nedeni ile formasyon hatasının düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, c_4 parametresi diğer parametrelere nazaran daha yavaş bir artışla başlangıç değerinden yükselerek 18. saniyede yaklaşık 10 değerine ulaştığı devamında ise, formasyon hatasının azalması nedeni ile artış hızının yavaşlayarak 30. saniyede yaklaşık 11.7 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Son olarak, tüm sürünün yaklaşık 45. saniyede hızları üzerine sağladıkları fikir birliği ile ilgili parametre değerinin bu saniyeden itibaren yaklaşık 12 değerinde sabit kaldığı görülmüştür.



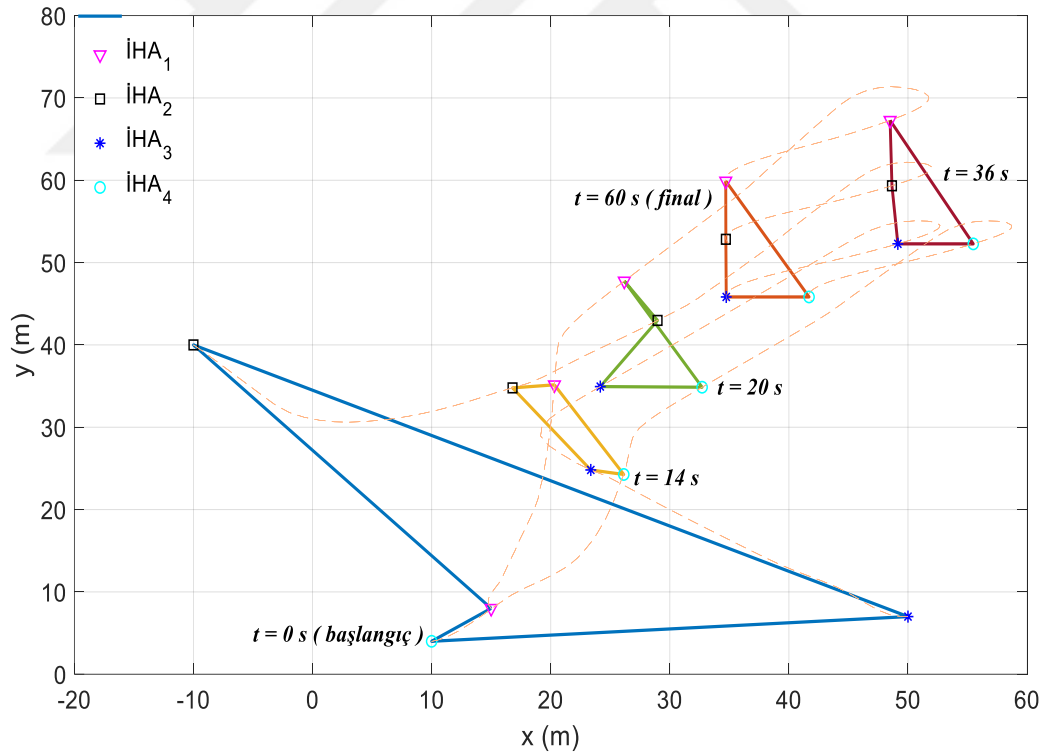
Şekil 25. İHA’ların bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimleri

Şekil 26’da İHA’ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri sunulmuştur. Bu formasyon için İHA’lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} 15 & -10 & 50 & 10 \\ 8 & 40 & 7 & 4 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. İHA₁’in arzu edilen formasyon konumuna ulaşmak için başlangıç konumundan hareketle y eksenini boyunca ilerlediği ve devamında ise, her iki eksen boyunca ilerleyerek formasyon oluşum noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir. İHA₂’nin formasyon oluşumu sırasında yörünge hareketleri incelendiğinde; dik üçgen formasyonunu oluşturmak için özellikle x eksenini yönünde hareket ettiği ve yaklaşık 20. metreden itibaren y eksenini boyunca da hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₃ için önceden tanımlanmış formasyon komşularının İHA₂ ve İHA₄ olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ilgili İHA’nın arzu edilen formasyon düzenini sağlamak için başlangıç konumundan ters x eksenini yönünde hareket ettiği ve devamında ise, İHA₂ ve İHA₄ ile sağladığı bilgi paylaşımı ile her iki İHA arasında konumlanarak arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, $x = 20$; $y = 30$ noktasında İHA₁ ile çarpışmadan kaçınarak güvenli bir şekilde formasyon uçuşuna devam ettiği görülmüştür. İHA₄’ün formasyon oluşumu sırasında yörünge hareketleri incelendiğinde; başlangıç konumundan hızla her iki eksen boyunca hareket ederek formasyon uçuşunu sürdürdüğü ve $x = 28$; $y = 30$ noktasında yön değişimi gerçekleştirerek arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 27’de İHA’lar için 0 (başlangıç), 14, 20, 36 ve 50. (final) saniyelerindeki formasyon oluşum adımları sunulmuştur. İlk olarak, başlangıç konumları itibari ile İHA’ların üçgen formunda oldukları görülmektedir. Daha sonra, İHA’ların hareketlenerek 14. saniyede kare formunu aldıkları ve devamında ise, 20. saniyede önceden tanımlı komşulukları üzerinden İHA₂’nin formasyon oluşumu için İHA₁ ile İHA₄’ün arasına hareket ettiği gözlemlenmiştir. Daha sonra İHA’lar, Şekil 20’de tanımlanmış olan dik üçgen formasyonunu gerçekleştirmek için 36. saniyede doğru dizilime geldikleri ve son adım olan 60. saniyede dik üçgen formasyonunu başarılı bir şekilde oluşturdukları gözlemlenmiştir.



Şekil 26. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 27. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 28’de İHA’ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve lineer hız bilgileri sunulmuştur. İHA₁’in x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan 15. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve ilgili eksen boyunca hareketini ileri yönde devam ettirerek yaklaşık 18 saniye boyunca hareketini koruduğu görülmektedir. Daha sonra, 18. saniyeden itibaren y ekseninde de harekete başladığı ve böylece hem İHA₁ hem de İHA₃ ile aynı doğrultuda hareket ettiği gözlemlenmiştir. Devamında ise, ilgili İHA’nın yaklaşık 25. saniyeden itibaren İHA₁ ve İHA₃ ile aynı x eksen doğrultusunda hareket ederek formasyon konumuna gittiği gözlemlenmiştir. İHA₁’in x eksen boyunca sahip olduğu lineer hız bilgileri incelendiğinde ise, 1. saniyeye kadar çok az ters x yönünde hareket ettiği ve devamında ise, yaklaşık 2. saniyede hızının 1.15 m/s değerine ulaştığı görülmektedir. Daha sonra, ilgili İHA’nın hız değeri hafif salınımlarla azalarak yaklaşık 10. saniyede 0.15 m/s değerine gerilediği ve ardından, yaklaşık 13. saniyede tekrar artarak İHA₃ ve İHA₄ ile aynı hız değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Devamında ise, ilgili İHA’nın hız değeri 18. saniyeden itibaren İHA₃ ile aynı genlik ve formda olduğu ve son olarak 37. saniyeden itibaren diğer İHA’lar ile fikir birliği sağlayarak sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. İHA₁’in y eksenindeki hareketi incelendiğinde ise; ilgili eksenindeki başlangıç noktası olan 8. metreden harekete başladığı ardından, y eksen boyunca ilerleyerek 27. saniyede yaklaşık 73. metreye ulaştığı ardından, y ekseninde ters yönde hareket ederek 60. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA₁’in y eksenindeki lineer hızı incelendiğinde, yaklaşık 2. saniyede 2.5 m/s genlik değerine ulaştığı, devamında ise bu hız değerini yaklaşık 26 saniye boyunca koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 27. saniyeden itibaren hız değeri azalarak yaklaşık 29. saniyede hız değeri sıfıra inmiş ve devamında, ilgili İHA’nın ters yönde hareket etmesi nedeni ile 30. saniyede yaklaşık -1 m/s değerine gerilemiştir. Sonrasında, 40. saniyeden itibaren ilgili İHA sürüdeki diğer İHA’lar ile hızları üzerinde fikir birliği sağlamış ve hız değerleri sıfıra yakınsamıştır.

Şekil 28’de İHA₂’nin x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç noktası olan -10. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve yaklaşık 30 saniye boyunca x ekseninde ileri yönde hareket ederek İHA₁ ve İHA₃ ile aynı x eksen doğrultusuna geldikleri gözlemlenmiştir. Daha sonra, ilgili İHA ile birlikte İHA₁ ve İHA₃’te hareketlerini aynı eksen üzerinde sürdürerek arzu edilen formasyon konumlarına ulaştıkları gözlemlenmiştir. Diğer yandan, İHA’nın x eksenindeki hızı incelendiğinde, ilk 6 saniye boyunca artış göstererek yaklaşık 2.5 m/s değerine ulaştığı ve devamında ise, yaklaşık 18. saniyeye kadar bu hız değerini koruduğu görülmüştür. Ardından, İHA’nın hız değeri azalarak 20. saniyeden itibaren yaklaşık 1.8 m/s değerine gerilediği ve bu hız değerini 29. saniyeye

kadar koruduğu görülmüştür. Sonrasında, İHA'nın x ekseninde ters yönde hareket etmesinden dolayı hız değeri azalarak yaklaşık 30. saniyeden sonra negatif değere gerilediği ve bu noktada sürüdeki diğer İHA'lar ile birlikte hızları üzerinde fikir birliği sağladıklarından dolayı hız değerinin formasyon uçuşu sonunda sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. İHA₂'nin y eksenini boyunca yörünge hareketleri incelendiğinde ise, İHA'nın 40. metreden itibaren formasyon uçuşuna başladığı ve yaklaşık 10. saniye kadar y ekseninde yatay bir hareket sergilediği görülmüştür. Ardından, ilgili İHA'nın yaklaşık 27. saniyeye kadar y ekseninde ileri yönlü hareket ederek yaklaşık 64. metreye ulaştığı devamında ise, y ekseninde ters yönde hareket ederek formasyon uçuşunun sonunda yaklaşık 54. metrede konumlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'nın y eksenindeki hızı incelendiğinde, yaklaşık ilk 5 saniye boyunca y ekseninde ters yönde hareket etmesinden dolayı hızı -2.5 m/s değerine gerilemiş ve devamında ise, hızı artarak 20. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine ulaşmıştır. Daha sonra, 21 ile 26. saniyeler arasında sahip olduğu hız değerini korumuş olsa da devamında, hız değeri azalarak yaklaşık 28. saniyede sıfır değerine gerilemiştir. Ardından, ilgili İHA'nın 28. saniyeden itibaren İHA₁ ve İHA₃ ile fikir birliği sağladığı, yaklaşık 40. saniyeye kadar aynı hız değerlerine sahip oldukları görülmüş ve ayrıca, 45. saniyeden itibaren tüm sürünün hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 28'de İHA₃'ün x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç olarak 50. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve devamında, eksen boyunca ters yönde hareket ederek 14. saniyede yaklaşık 19. metreye geldiği görülmektedir. Devamında, İHA'nın x ekseninde arzu edilen formasyon konumuna gitmek için ileri yönde hareket ettiği ve sonrasında, 29. saniyede tekrar 50. metreye geldiği ve 30. saniyeden itibaren İHA₁ ve İHA₂ ile aynı doğrultuda hareket ederek arzu edilen formasyon konumu olan 37. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, İHA'nın eksen boyunca 3. saniyeye kadar ters yönde hareket ettiği ve bunun sonucunda hız değerinin yaklaşık -2.3 m/s olduğu ve devamında ise, hız değerini 13. saniyeye kadar koruduğu görülmüştür. Daha sonra, 13. saniyeden itibaren İHA'nın x eksenini boyunca ileri yönde hareket etmesinden kaynaklı olarak, hız değerinin 16. saniyede yaklaşık 2.3 m/s değerine ulaştığı ve 28. saniyeye kadar hız değerini koruduğu gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın 29. saniyede sürüde bulunan diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı ve böylece, formasyon sonunda hız değerinin sıfırda sabit kalarak başarılı bir formasyon gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Diğer yandan, İHA₃'ün y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, formasyon uçuşuna 7. metreden başladığı ve devamında, y eksenini boyunca ileri yönde hareket ederek 10. saniyeden itibaren İHA₄ ile birlikte aynı eksende hareket ederek yaklaşık 49. metrede formasyon konumuna ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenini boyunca sahip olduğu hız

verileri incelendiğinde, başlangıç anından itibaren hız değeri artarak 3. saniyede yaklaşık 1.9 m/s değerine ulaştığı ve ardından, bu hız değerini aralarındaki dalgalanmalara rağmen (çarpışmadan kaçınma algoritması nedeni ile) 27. saniyeye kadar koruduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, hız değeri azalarak 29. saniyede sıfıra ve 30. saniyede yaklaşık -0.7 m/s değerine gerilemiş olsa da, 40. saniyede sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlamış ve İHA'nın arzu edilen formasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği görülmüştür.

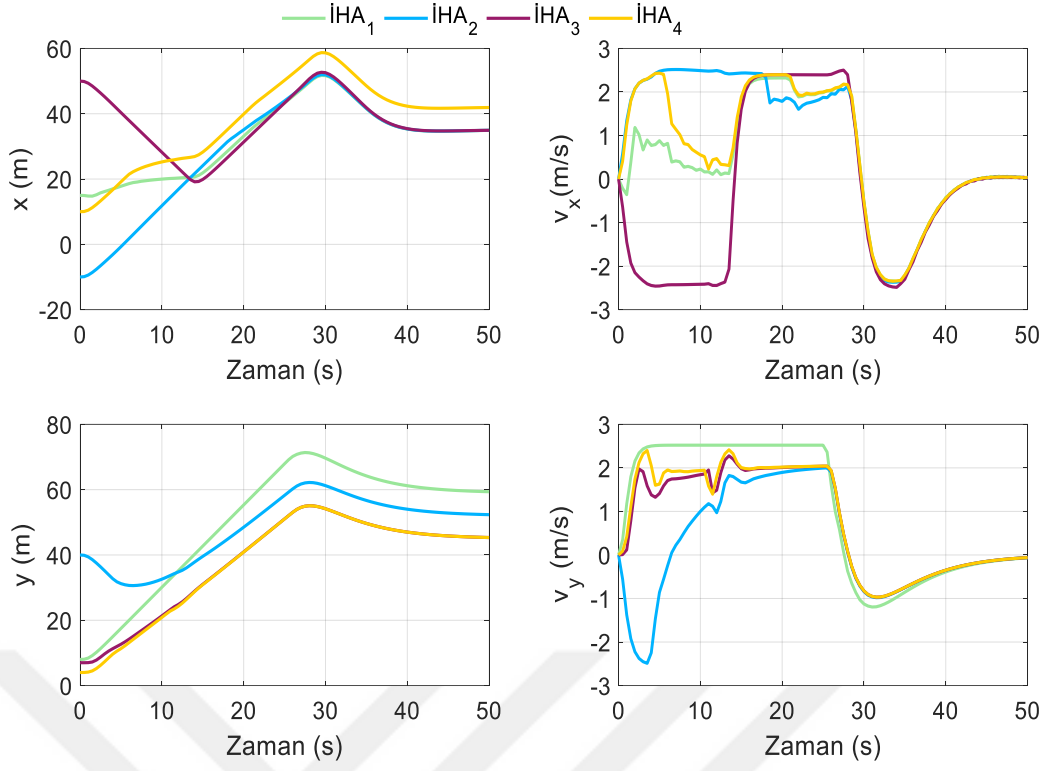
Şekil 28'de İHA₄'ün x eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde; başlangıç olarak 10. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve devamında İHA₁ ile 5. saniyede çarpışmadan kaçınarak formasyon uçuşuna devam ettiği sonrasında ise, İHA₃ ile 11. saniyede benzer şekilde çarpışmadan kaçınarak 30. saniyede 60. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, arzu edilen formasyon konumu olan 42. metreye gelerek formasyonu tamamladığı gözlemlenmiştir. İlgili İHA'nın x ekseninde sahip olduğu hız verileri incelendiğinde ise, başlangıç anından itibaren artarak 5. saniyede yaklaşık 2.3 m/s değerine ulaştığı ve devamında, hız değeri azalarak 13. saniyede 0.15 m/s değerine gerilediği görülmüştür. Sonrasında, hız değeri tekrar artarak 18. saniyede tekrar 2.3 m/s değerine ulaştığı ve devamında ise, 28. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine gerilediği ve azalışını sürdürerek 30. saniyede sıfıra indiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın sürüdeki diğer İHA'lar ile 30. saniyeden itibaren fikir birliği sağladığı ve böylece hız değerinin sıfırda sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA₄'ün y ekseni boyunca yörünge hareketi incelendiğinde, başlangıç konumu olan 4. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve ardından, y eksini boyunca ileri yönde hareket ederek 28. saniyede yaklaşık 54. metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, İHA₃ ile birlikte aynı yörünge boyunca hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna başarılı bir şekilde vardığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ilgili İHA'nın y ekseni boyunca sahip olduğu hız verileri incelendiğinde ise, başlangıç anından itibaren artarak 3. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine ulaştığı ve devamında, dalgalı bir artışla birlikte 28. saniyeye kadar hız değerini koruduğu görülmüştür. Son adımda ise, İHA 28. saniyeden itibaren hız değerini azaltarak 29. saniyede sıfır değerine gerilediği ve ardından, 40. saniyede sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak hız değerinin sıfırda sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 29'da İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen hata değerleri araçların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'ların başlangıç anında sahip oldukları hız

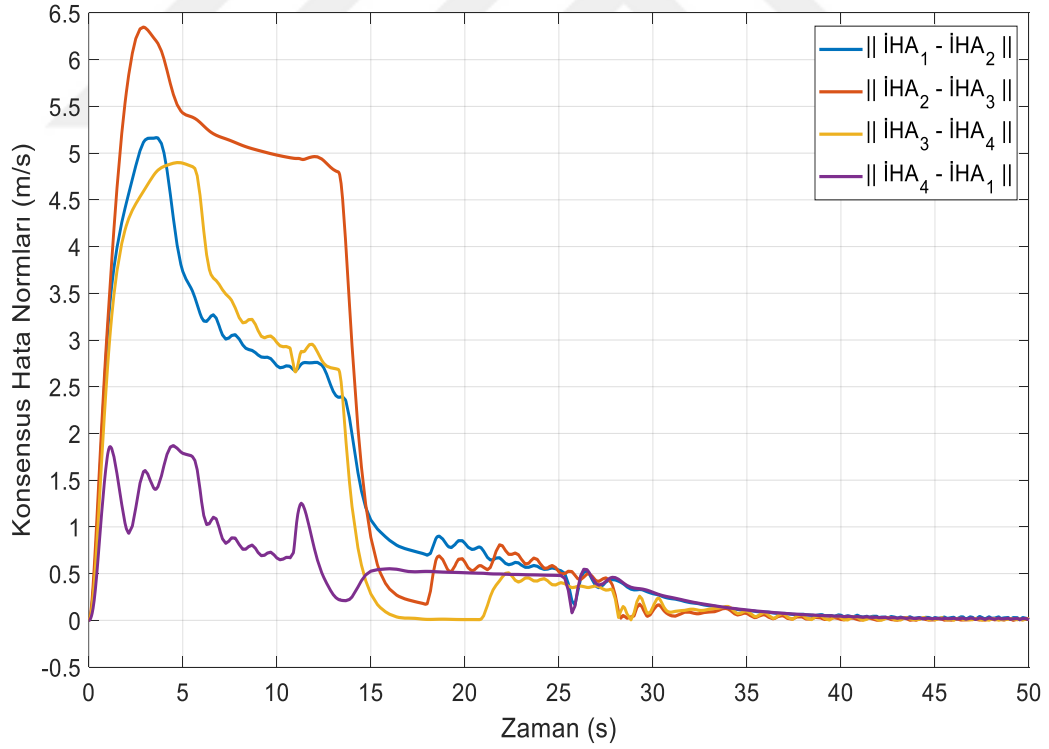
değerlerinin sıfır olması nedeni ile, hata değerinin de başlangıç anında sıfır olduğu ve devamında ise, İHA'ların formasyon uçuşuna başlamaları nedeniyle ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 5.1 değerine ulaştığı görülmüştür. Ardından, Şekil 28'den de görüleceği üzere, İHA'ların ilk 30 saniye boyunca hızları üzerinde her hangi bir fikir birliği sağlayamamalarından dolayı konsensüs hata normunun sıfıra yakınsamadığı görülmüştür. Devamında ise, İHA'ların 35. saniyeden sonra hızları üzerinde fikir birliği sağlamalarından dolayı, hata değerinin azalarak sıfıra yakınsadığı ve özellikle 45. saniyeden itibaren hata norm değerinin sıfır olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 29'da turuncu renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'lar arasındaki hata normunun diğerlerine göre en büyük genlikte olduğu görülmektedir. Şekil 28'de, her iki İHA'nın x eksenindeki lineer hızlarının değişimi incelendiğinde, aralarındaki formasyon hatasının ilk 18 saniye boyunca çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüzden, İHA'ların sahip olduğu hata değeri 3. saniyeye kadar hızla artarak yaklaşık 6.3 değerine ulaştığı ve devamında ise, İHA'lar arasındaki formasyon hatasının 10. saniyeden itibaren azalış gösterdiği görülmektedir. Daha sonra yaklaşık 30. saniyeden itibaren, her iki İHA'nın hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları ve devamında ise hata değerinin sıfıra gittiği ve arzu edilen formasyon konumlarına ulaştıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 29'da sarı renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, 5. saniyede ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının en yüksek değeri olan yaklaşık 5 değerine ulaştığı ardından, 15. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arasında fikir birliğinin sağlandığı ve böylece formasyon hata değerinin yaklaşık 0.3 değerine gerilediği görülmüştür. Daha sonra, İHA'lar arasında çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girdiği ve İHA'lar arasındaki hata değerinin tekrar 21 ile 28. saniyeler arasında artış göstererek yaklaşık 1 değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreden çıkmasıyla beraber, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin özellikle 45. saniyeden itibaren tekrar azalarak sıfıra indiği gözlemlenmiştir. Son olarak, Şekil 29'da mor renk ile verilen eğri İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 28'den de görüleceği üzere, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının formasyon uçuşunun başlangıcından itibaren oldukça az olduğu bu sebeple, iki İHA arasındaki hata normunun da başlangıç anından itibaren (diğer hata normlarına kıyasla) oldukça küçük değerlerde olduğu görülmüş ve yaklaşık 45. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak iki İHA arasındaki hata değerinin sıfıra gittiği gözlemlenmiştir.



Şekil 28. İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve hız bilgileri



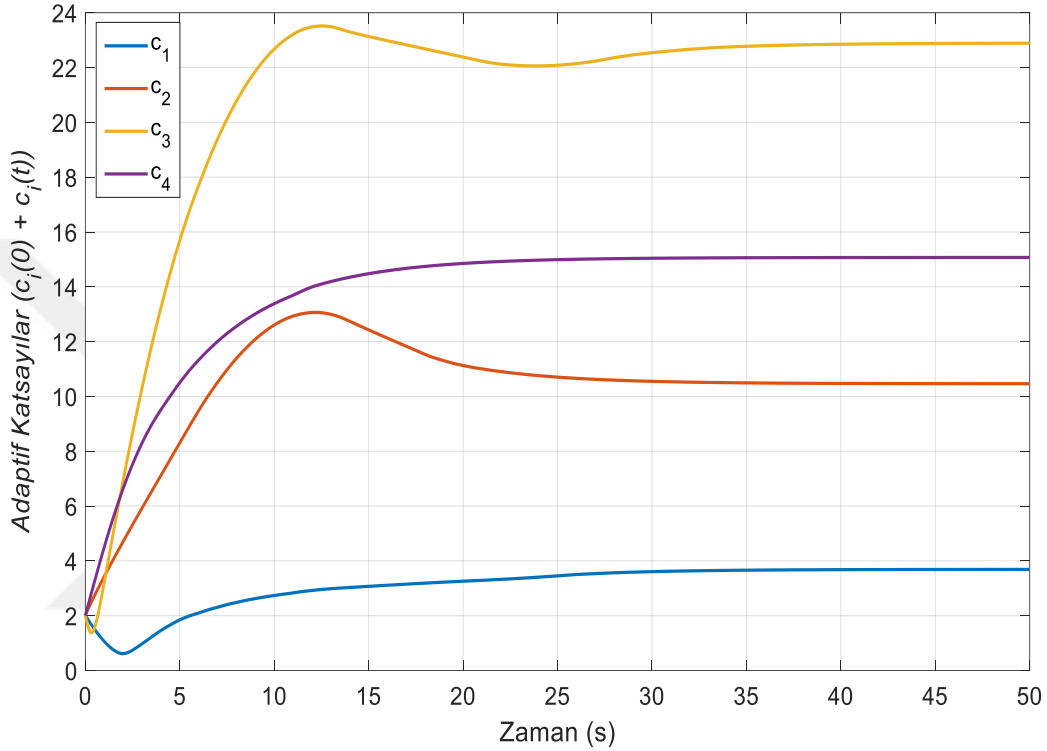
Şekil 29. İHA'lar arasında dik üçgen formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

Şekil 30'da İHA'ların dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimleri sunulmuştur. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri c_1 parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 28 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasında başlangıç anındaki formasyon hatasının hızla azalarak 15. saniyede yaklaşık 1 m/s değerine gerilediği görülmektedir. Bu sebeple, adaptasyon parametresi önce başlangıç değeri olan 2'den azalış göstererek yaklaşık 2.5'inci saniyede 1 değerinin altına gerilediği ve devamında ise, yaklaşık 30. saniyeye kadar yavaşça artarak yaklaşık 3.9 değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Ardından, ilgili İHA'ların 30. saniyeden itibaren aralarında fikir birliği sağladıkları görülmüş ve formasyon uçuşu boyunca önerilen formasyon kontrolcüsü ile hesaplanan c_1 parametresinin 3.9 değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 30'da turuncu renk ile verilen eğri c_2 parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere, adaptasyon parametresinin başlangıç değeri olan 2'den itibaren hızla yükselerek yaklaşık 12. saniyede 13 değerine yükseldiği ardından, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak c_2 parametresi de azalarak 25. saniyede yaklaşık 11 değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, ilgili İHA'lar arasında yaklaşık 30. saniyeden itibaren fikir birliğinin sağlandığı ve bunun sonucunda c_2 parametresinin yaklaşık olarak 11 değerinde sabit kalarak İHA'ların başarılı bir formasyon gerçekleştirmelerini sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 30'da sarı renk ile verilen eğri c_3 parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 28 incelendiğinde, belirtilen İHA'lar arasında özellikle x eksenindeki formasyon hatasının (hem konum hem de hızlar dikkate alındığında) büyüklüğünün diğer İHA'lar arasındaki hatayla kıyaslandığında en büyük hatalardan biri olduğu görülmektedir. Bu nedenle c_3 parametresi, meydana gelen bu hatayı kompanze etmek için başlangıç değerinden itibaren hızla artarak 10. saniyede yaklaşık 23.8 değerine ulaştığı ve ardından, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin azalmasıyla birlikte parametre değerinin de azalarak 24. saniyede yaklaşık 22 değerine gerilediği görülmüştür. Daha sonra, İHA'lar arasında 30. saniyeden itibaren fikir birliği sağlandığı ve bunun sonucunda c_3 parametresinin de bu saniyeden itibaren yaklaşık 23 değeri etrafında sabit kalarak İHA'ların başarılı bir formasyon gerçekleştirmelerini sağlamıştır.

Şekil 30’da mor renk ile verilen eğri c_4 parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, c_4 parametresi başlangıç değerinden yaklaşık 15. saniyeye kadar artarak yaklaşık 15 değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 28 incelendiğinde, ilgili İHA’lar arasındaki mesafe hatasının başlangıç anından itibaren oldukça düşük olduğu bu nedenle, c_4 parametresi de kısa sürede ihtiyaç duyulan 15 değerine ulaşarak İHA’ların başarılı bir formasyon gerçekleştirmelerini sağlamıştır.

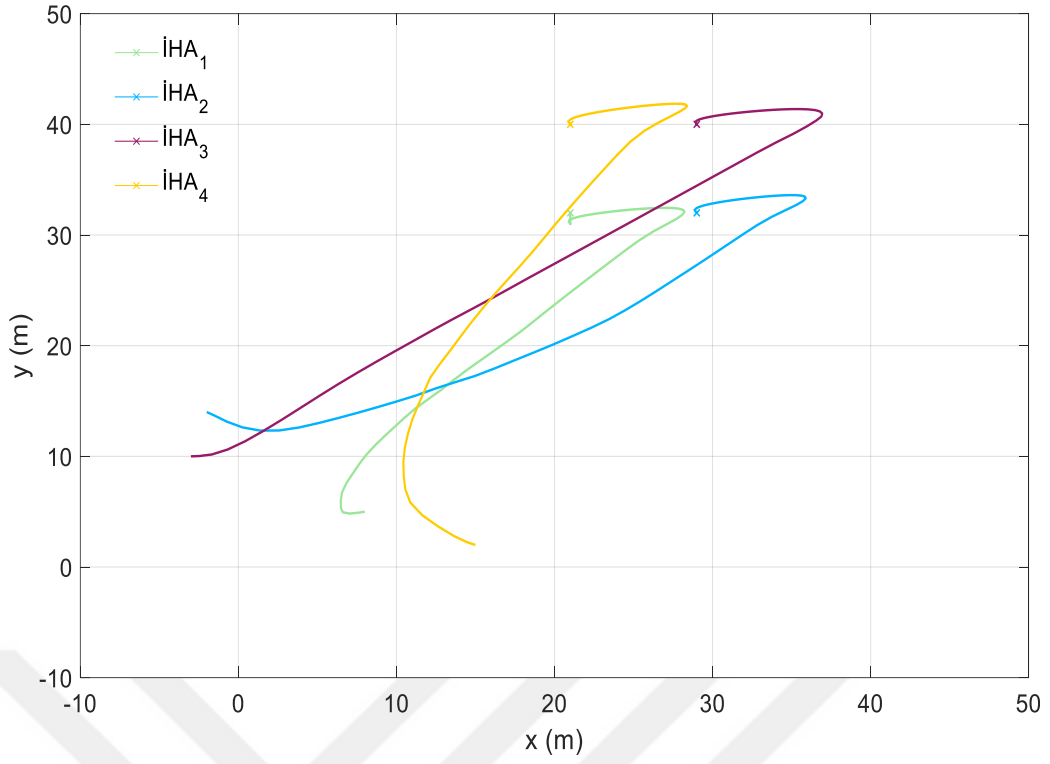


Şekil 30. İHA’ların dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimler

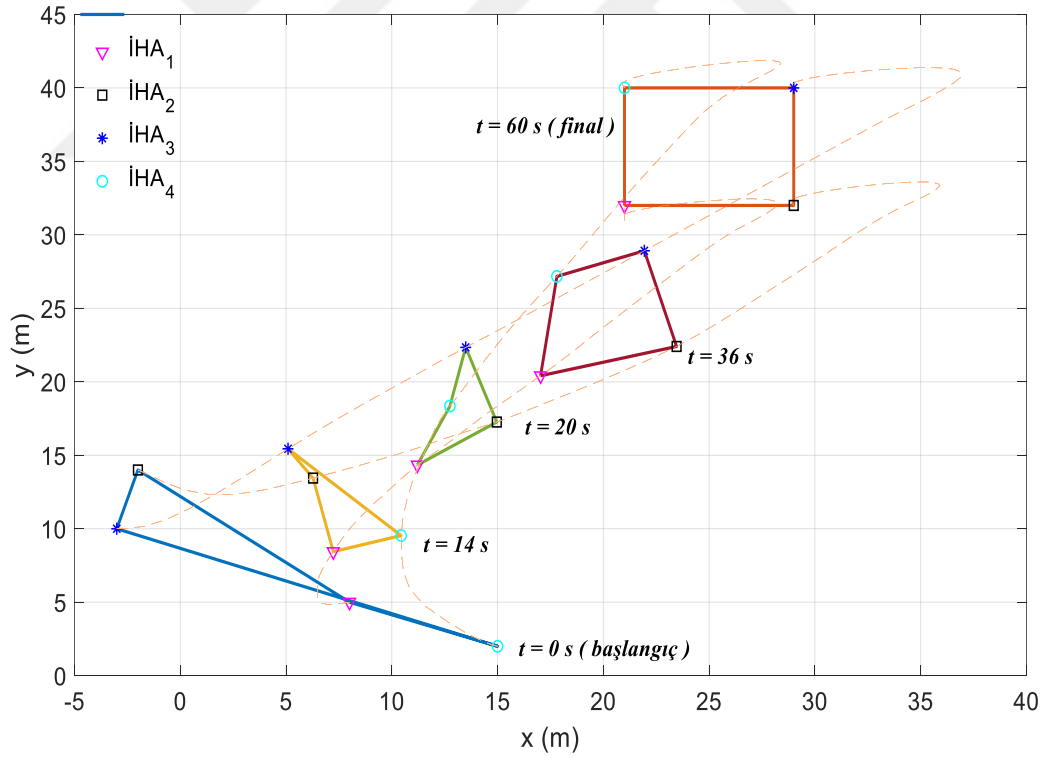
Şekil 31’de İHA’ların kare formasyon uçuşu boyunca x ve y yörüngelerindeki hareketleri sunulmuştur. Bu uçuş için İHA’lara ait formasyon başlangıç konumları ise $[x_{0i} \ y_{0i}]^T = \begin{bmatrix} 8 & -2 & -3 & 15 \\ 5 & 14 & 10 & 2 \end{bmatrix}$ şeklinde tanımlanmıştır. Şekilden İHA₁’in başlangıç konumundan hızla hareket ederek x ve y eksenleri boyunca hareket ettiği ve hızlı bir şekilde arzu edilen referans formasyon konumuna geldiği gözlemlenmiştir. İHA₂’nin formasyon uçuşu boyunca hareketi incelendiğinde, İHA’nın başlangıç konumundan hızlı bir şekilde hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna geldiği ayrıca, $x = 12$; $y = 14$ noktasında diğer İHA’ların hareketi sırasında çarpışmadan kaçınma algoritması sayesinde herhangi bir çarpışma meydana gelmediği gözlemlenmiştir. İHA₃’ün yörünge hareketi incelendiğinde, formasyon uçuşu sırasında İHA₁ ve İHA₂’nin aralarından geçerek kendisi için tanımlanan referans formasyon konumuna geldiği ve ayrıca, çarpışmadan kaçınma algoritması sayesinde

herhangi bir çarpışma meydana getirmeden güvenli bir şekilde formasyon uçuşunu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Son olarak, İHA₄'ün başlangıç konumunun referans formasyon konumuna (y eksenini için) en uzak konumda olmasına rağmen, y ekseninde hızlıca hareket ederek arzu edilen formasyon konumuna geldiği görölmüştür.

şekil 32'de İHA'lar için 0 (başlangıç), 14, 20, 36 ve 60. (final) saniyelerindeki formasyon oluşum adımları sunulmuştur. İlk olarak, başlangıç konumları itibari ile İHA'ların üçgen formunda oldukları görölmektedir. Daha sonra, 14. saniyede İHA'ların arzu edilen formasyon düzenini gerçekleştirmek için önceden tanımlanmış komşuluklarına bağlı olarak hareket ettikleri ve üçgen formunu aldıkları görölmektedir. Ardından 20. saniyede İHA'ların uygun formasyon dizilişlerini sağlamak adına hareketlerine devam ettikleri ve 36. saniyede arzu edilen formasyon dizilişlerini oluşturdukları ve yamuk formunu aldıkları gözlemlenmiştir. Son adım olan 60. saniyede ise, İHA'ların yönlü-bağlı graf yapısına uygun olarak oluşturdukları kare formasyon düzenini başarıyla sağladıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 31. İHA'ların kare formasyon uçuşu boyunca izledikleri yörünge bilgileri



Şekil 32. İHA'ların kare formasyon uçuşu boyunca belirli saniyelerde oluşturdukları formasyon adımları

Şekil 33'te İHA'ların kare formasyon uçuşu boyunca sahip oldukları yörünge ve lineer hız bilgileri sunulmuştur. İHA₁'in x eksenı boyunca sahip olduğu yörünge hareketleri incelendiğinde, başlangıç noktası olan 8. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve ardından, yaklaşık 18. saniyede İHA₄ ile aynı doğrultuya geldikleri ve 20. saniyede yaklaşık 29. metrede oldukları görülmüştür. Daha sonra, İHA₁ ve İHA₄'ün 20. saniyeden itibaren x eksenı boyunca aynı hizada hareketlerini sürdürdükleri ve arzu edilen formasyonu yaklaşık 21. metrede gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA₁'in x eksenindeki hızı incelendiğinde, başlangıç anından 1. saniyeye kadar İHA'nın x ekseninde ters yönde hareket etmesinden dolayı hızı -1 m/s değerinde olduğu ve ardından, İHA'nın x ekseninde ileri yönlü harekete başladığı için hızı artarak 12. saniyede yaklaşık 1.8 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, ilgili İHA bu hız değerini yaklaşık 18 saniye boyunca korumuş ve devamında ise, hızını azaltarak 19. saniyede sıfır değerine düşürdüğü görülmüştür. Bununla birlikte, İHA'nın 20. saniyeden itibaren x yönünde ters hareket ettiği ve bu sebeple hız değerini 22. saniyede -1 m/s'ye düşürdüğü ve devamında ise, sürüde bulunan diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak hızının sıfır değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. İHA₁'in y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde ise, ilgili İHA'nın 5. metreden formasyon uçuşuna başladığı ardından, kare formasyonunu oluşturmak için İHA₂ ile aynı yörüngeyi izledikleri ve sonunda aynı noktada arzu edilen formasyon konumlarına geldikleri görülmüştür. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki lineer hızları incelendiğinde, başlangıç anında y ekseninde ters yönlü hareketinden kaynaklı olarak hız değerı -0.2 m/s değerine gerilese de devamında, y ekseninde ileri yönlü hareket ettiği ve buna bağlı olarak hız değerı 5. saniyede yaklaşık 1.7 m/s değerine yükseldiği görülmüştür. Sonrasında, İHA'nın hız değerini yaklaşık 18. saniyeye kadar koruduğu ve ardından, 19. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak hız değerinin sıfır değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 33'te İHA₂'nin x eksenı boyunca sahip olduğu yörünge hareketleri incelendiğinde, -2. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve devamında ise, İHA₃ ile birlikte x ekseninde ileri yönlü hareket ederek 18. saniyede yaklaşık 37.5'inci metreye ulaştığı görülmüştür. Ardından, 19. saniyeden itibaren x ekseninde ters yönde hareket ederek yaklaşık 30. saniyede 30. metreye geldiği ve bu noktada İHA₃ ile birlikte arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA₂'nin x eksenı boyunca sahip olduğu hız değerleri incelendiğinde, İHA'nın başlangıç anından itibaren x ekseninde ileri yönde hareket ettiği ve 5. saniyede hız değerinin yaklaşık olarak 2.5 m/s olduğu ve devamında ise, bu hız değerini 15. saniyeye kadar koruduğu gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın hız değerı azalarak 18. saniyede yaklaşık 1.9 m/s değerine gerilediği devamında ise, sürüde bulunan diğer İHA'lar ile birlikte fikir birliği sağlayarak hızlarının aynı genlik ve formda hareket ederek

formasyon sonunda sıfır değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. İHA₂'nin y eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde ise, İHA'nın 14. metreden itibaren formasyon hareketine başladığı ve ardından, yaklaşık 5. saniyeye kadar y ekseninde ters yönde hareket ederek yaklaşık 11. metreye geldiği görülmüştür. Daha sonra, 20. saniyeye kadar y ekseninde ileri yönde hareket ederek yaklaşık 34. metreye ulaştığı ve ardından, İHA₁ ile aynı eksende hareket ederek yaklaşık 33. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA'nın y ekseninde sahip olduğu hız verileri incelendiğinde, konum hareketinde olduğu gibi İHA'nın başlangıç anından 5. saniyeye kadar y ekseninde ters yönde hareket etmesinden dolayı hız değerinin yaklaşık -1.1 m/s olduğu ve ardından, İHA'nın y ekseninde ileri yönlü hareketinden dolayı 18. saniyeye kadar hız değerinin artarak yaklaşık 1.65 m/s'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra İHA₂, sürüde bulunan diğer İHA'lar ile arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için hızları üzerinde fikir birliği sağlamış ve tüm hız değerlerinin formasyon uçuşunun sonunda sıfır değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 33'te İHA₃'ün x eksenini boyunca sahip olduğu yörünge hareketleri incelendiğinde, -3. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve devamında ise İHA₁ ile birlikte hareket ederek yaklaşık 18. saniyede 35. metreye ulaştığı görülmüştür. Ardından ilgili İHA, İHA₁ ile birlikte hareketini sürdürerek yaklaşık 34. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA₃'ün x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, formasyon başlangıç anından itibaren 5. saniyeye kadar hız değerinin artarak yaklaşık 2.2 m/s değerine ulaştığı devamında ise, yaklaşık 18. saniyeye kadar bu hız değerini koruduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra İHA, 18. saniyeden itibaren hız değerini düşürmüş ve 19. saniyede yaklaşık sıfır değerine indirgemıştır. Ayrıca, İHA'nın hız değerini sıfıra düşürdükten sonra sürüde bulunan diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak 30. saniyeden itibaren hız değerini sıfırda sabit tutarak arzu edilen formasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. Bununla birlikte, İHA₃'ün y eksenindeki yörünge hareketleri incelendiğinde, formasyona 10. metrede başladığı ve ardından, İHA₄ ile beraber y ekseninde ileri yönde hareket ederek 19. saniyede yaklaşık 42. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra özellikle 20. saniyeden itibaren ilgili İHA, İHA₄ ile birlikte hareket ederek 40. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaşmıştır. Ayrıca, ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, başlangıç anından 5. saniyeye kadar artış göstererek yaklaşık 2.1 m/s değerine ulaştığı ve ardından, hız değeri hafif azalarak 18. saniyede yaklaşık 2 m/s değerine gerilediği görülmüştür. Bununla birlikte, İHA'nın özellikle 20. saniyeye kadar hız değeri azalarak sıfıra değerine düştüğü ve devamında ise, 30. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağladığı gözlemlenmiştir.

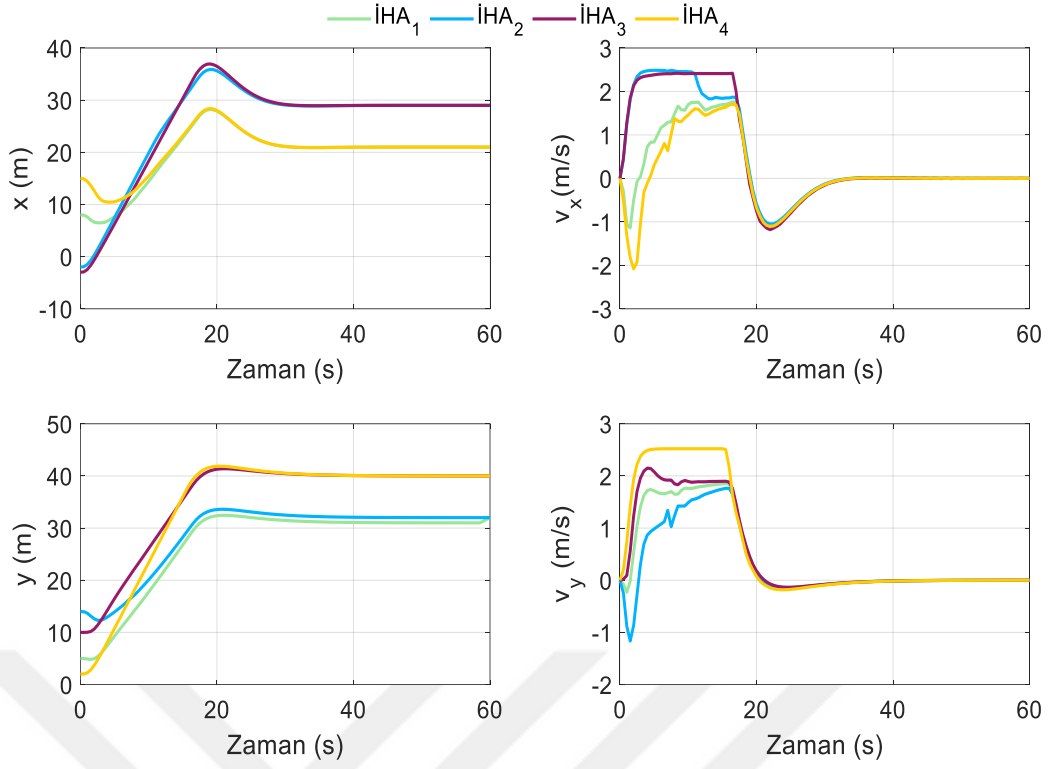
Şekil 33'te İHA₄'ün x eksenini boyunca sahip olduğu yörünge hareketleri incelendiğinde, 15. metreden formasyon uçuşuna başladığı ve devamında, x ekseninde ters yönde hareket ederek 10. saniyede 11. metrede konumlandığı gözlemlenmiştir. Ardından, İHA'nın x ekseninde ileri yönlü hareket ederek 19. saniyede yaklaşık 29. metreye ulaştığı ve devamında, 20. saniyeden itibaren İHA₁ ile birlikte aynı doğrultuda hareket ederek yaklaşık 21. metrede arzu edilen formasyon konumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilgili İHA'nın x eksenindeki hız verileri incelendiğinde, başlangıç anından yaklaşık 6. saniyeye kadar x ekseninde ters yönde hareket ettiğinden hız değeri yaklaşık olarak -2 m/s olduğu ve devamında ise, ileri yönlü hareket ederek 19. saniyede hız değerinin yaklaşık 1.7 m/s'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, 19. saniyeden itibaren hız değerinin azalarak sıfıra gerilediği ve ardından, özellikle 23. saniyeden itibaren sürüdeki diğer İHA'lar ile fikir birliği sağlayarak formasyonu korumak için hız değerini sıfırda sabit tuttuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ilgili İHA'nın y eksenindeki yörünge hareketi incelendiğinde, başlangıç konumu olan 2. metreden harekete başladığı ve devamında y ekseninde ileri yönde hareketini sürdürerek 18. saniyede yaklaşık 42. metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra İHA₄, İHA₃ ile 20. saniyeden itibaren aynı eksen üzerinde hareket ederek yaklaşık 40. metrede arzu edilen formasyon düzenine ulaştıkları görülmüştür. Ayrıca ilgili İHA'nın y eksenindeki hız verileri incelendiğinde, başlangıç anından itibaren 5. saniyeye kadar artarak yaklaşık 2.5 m/s değerine ulaştığı ve ardından, İHA'nın hız değerini 18. saniyeye kadar koruduğu ve devamında ise azalarak 20. saniyede yaklaşık sıfır değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra İHA'nın, 23. saniyeden sonra sürüde bulunan diğer İHA'lar ile birlikte fikir birliği sağladığı ve hız değerini sıfırda sabit tutarak arzu edilen formasyonu başarıyla gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 34'te İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan konsensüs hata normlarının zamanla değişimi verilmiştir. Şekilde verilen hata değerleri araçların lineer hızları üzerinden elde edilmiştir. İlk olarak, şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'lar arasında başlangıç anında hız değerlerinin sıfır olması nedeni ile hata değerinin de sıfır olduğu ardından, formasyon başlangıç anından itibaren 3. saniyede hata değerinin yaklaşık 4.4 değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 33'ten de görüleceği üzere, İHA'lar arasındaki hız değerlerinin yaklaşık 18. saniyeden itibaren aynı genlik ve doğrultuda hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, hata normunun da azalarak 18. saniyede yaklaşık 0.3 değerine gerilediği ve devamında, İHA'ların hızları üzerinde sağladıkları fikir birliği ile hata değerinin 30. saniyeden itibaren sıfıra geldiği gözlemlenmiştir.

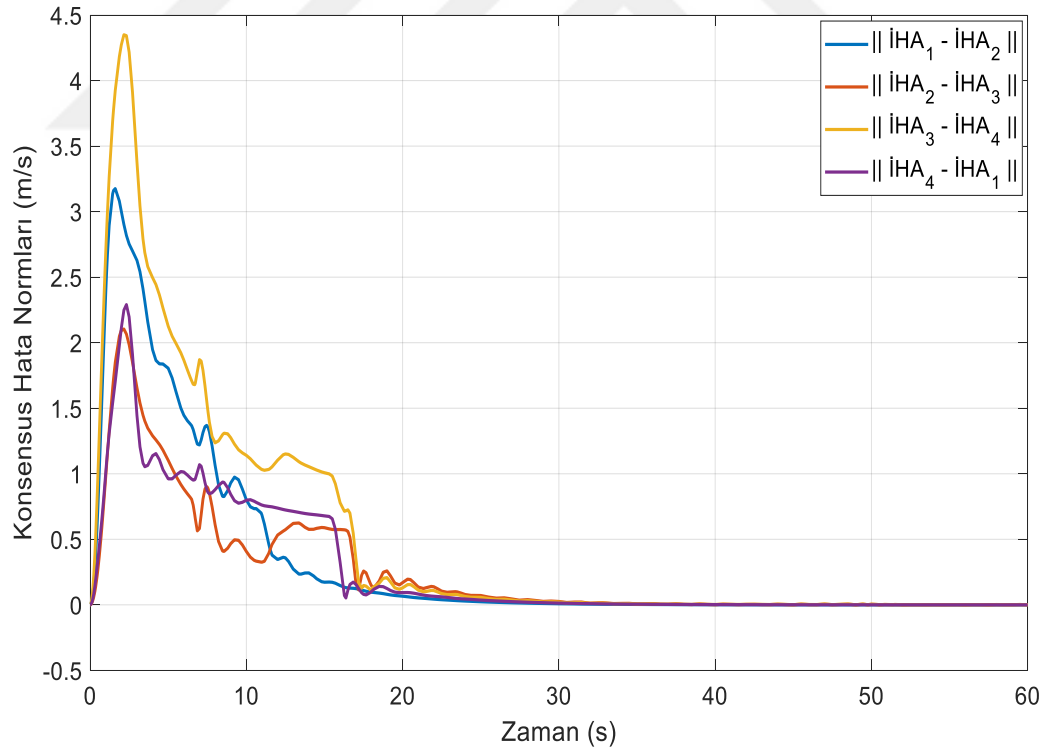
Şekil 34'te turuncu renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 33 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının başlangıç anından itibaren düşük olduğu bu nedenle, hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 2.1 değerine ulaştıktan sonra hızla azalarak yaklaşık 30. saniyeden itibaren sıfır değerine gerilediği gözlemlenmiştir.

Şekil 34'te sarı renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin (diğer hata değerlerine kıyasla) en yüksek hata değeri olduğu görülmektedir. Şekil 33 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının başlangıç anında çok büyük olduğu ve ardından, bu hata değerinin 19. saniyede uygun seviyeye gerilediği görülmektedir. Bu nedenle, İHA'lar arasındaki hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 4.4 değerine ulaştığı ve ardından, İHA'lar arasındaki hata değerinin azalarak 19. saniyede yaklaşık 0.35 değerine gerilediği gözlemlenmiş ve devamında, 30. saniyeden itibaren sıfır değerine inmiştir.

Şekil 34'te mor renk ile verilen eğri İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasının normunu temsil etmektedir. Şekil 33'ten de anlaşılabacağı üzere, ilgili İHA'lar arasındaki hız değerlerinin formasyon başlangıç anından itibaren birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple, İHA₄ ile İHA₁ arasındaki hata değerinin 3. saniyede yaklaşık 2 değerinde olduğu ve ardından, bu değerin azalarak 12. saniyede yaklaşık 0.4 değerine gerilediği görülmektedir. Ancak, 12 ile 18. saniyeler arasında hata değerinin çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesi nedeni ile tekrar yükselerek yaklaşık 0.7 değerine çıktığı ve sonrasında, tekrar azalarak 30. saniyede sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 33. İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında sahip oldukları konum ve hız bilgilerindeki değişim



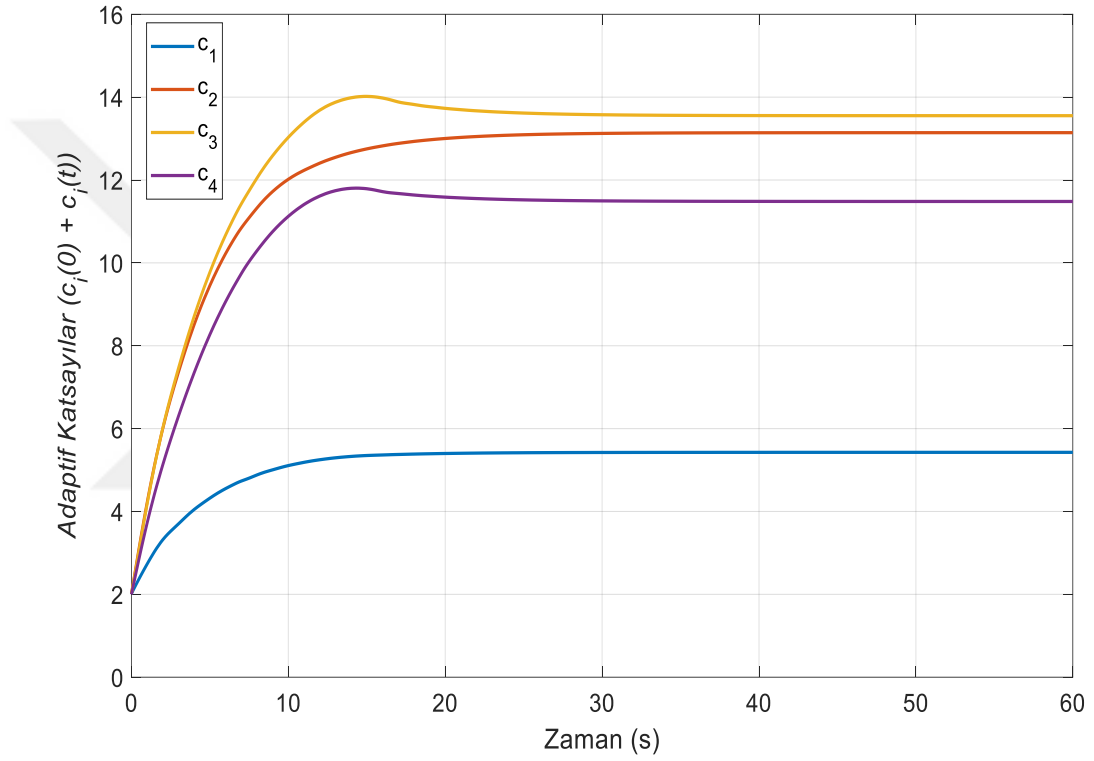
Şekil 34. İHA'lar arasında kare formasyon uçuşu boyunca meydana gelen konsensüs hata normlarının zamanla değişimi

Şekil 35'te İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimleri sunulmuştur. Şekilde mavi renk ile verilen eğri c_1 parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 33 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasında arzu edilen formasyon mesafesinin yaklaşık 10. saniyeden itibaren oluşmaya başladığı görülmektedir. Bu sebeple ihtiyaç duyulan c_1 parametresi, başlangıç değeri olan 2'den itibaren yavaşça artmaya başlamış ve 10. saniyede yaklaşık 5.4 değerine yükselmiştir. Ardından formasyon hatasının azalmasıyla birlikte, 19. saniyede 5.6 değerine gelerek İHA'lar arasında oluşan hatanın kompanze edilmesini sağlamıştır.

Şekil 35'te turuncu renk ile verilen eğri c_2 parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 33'te sunulan ilgili İHA'lara ait mesafe bilgileri incelendiğinde, x ekseninde aynı doğrultuda hareket ettikleri ancak y ekseninde aralarında yaklaşık 10 metrelik bir formasyon mesafesinin olduğu görülmektedir. Bu nedenle c_2 parametresi, hem oluşan formasyon hatalarını kompanze etmek hem de formasyon mesafesini korumak adına 10. saniyeye kadar hızla artarak başlangıç değeri olan 2 değerinden yaklaşık 12.8 değerine yükseldiği ve devamında ise, ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin azalmasıyla 20. saniyeden itibaren parametre değerinin yaklaşık 13.3 değerinde sabit kalarak İHA'ların başarılı bir formasyon gerçekleştirmelerini sağlamıştır.

Şekil 35'te sarı renk ile verilen eğri c_3 parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 34 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hata değerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple, c_3 parametresi oluşan hatayı kompanze etmek adına başlangıç değeri olan 2'den itibaren hızla yükselerek 13. saniyede yaklaşık 14 değerine yükseldiği ve ardından, hata değerinin azalmasıyla birlikte 20. saniyede yaklaşık 13.75 değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, Şekil 33'deki yörünge ve hız bilgileri ve Şekil 34'teki hata değeri incelendiğinde, c_3 parametresinin uygun değerinin yaklaşık 13.75 olduğu anlaşılmakta ve bu sayede, İHA'ların başarılı bir formasyon uçuşu gerçekleştirdikleri görülmektedir.

Şekil 35'te mor renk ile verilen eğri c_4 parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasında meydana gelen formasyon hatasına bağlı olarak elde edilen adaptasyon katsayısını temsil etmektedir. Şekil 33 incelendiğinde, ilgili İHA'ların x ekseninde aynı doğrultuda formasyon konumuna sahip oldukları, y ekseninde ise aralarında 10 metrelik bir formasyon oluşum mesafesine sahip oldukları görülmektedir. Bu sebeple c_4 parametresi, başlangıç değeri 2'den itibaren hızla artarak 13. saniyede yaklaşık 12 değerine yükseldiği devamında ise, 19. saniyede 11.8 değerine gerileyerek İHA'ların hızları üzerinde fikir birliğine varmalarını sağlamıştır. Böylece, İHA'ların başarılı bir formasyon gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 35. İHA'ların kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerindeki değişimler

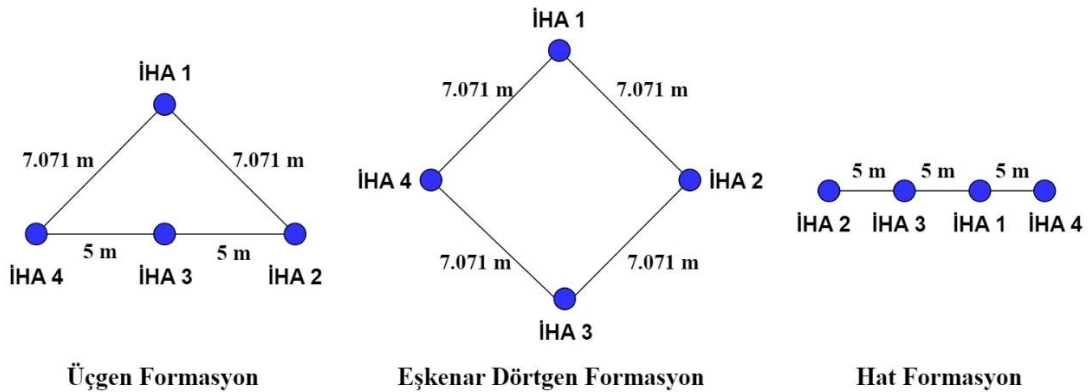
Gerçek Zamanlı Saha Testlerine Ait Deneysel Sonuçlar

GKTFK yöntemine ait deneyisel sonuçlar

Tezin bu bölümünde, İHA'ların GKTFK algoritması kullanılarak elde edilen gerçek zamanlı test sonuçları sunulmuştur. Saha çalışmaları bir futbol sahasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, saha testlerini gerçekleştirmek için sistem durum ve kontrol girdi matrisleri sırasıyla $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ olarak alınmıştır. Bununla birlikte, (38)'de verilen konsensüs formasyon kontrolcüsü için elde edilen parametre değerleri ise sırasıyla $P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1.1079 \end{bmatrix}$; $K = [0 \quad 0.55395]$ olarak elde edilmiştir.

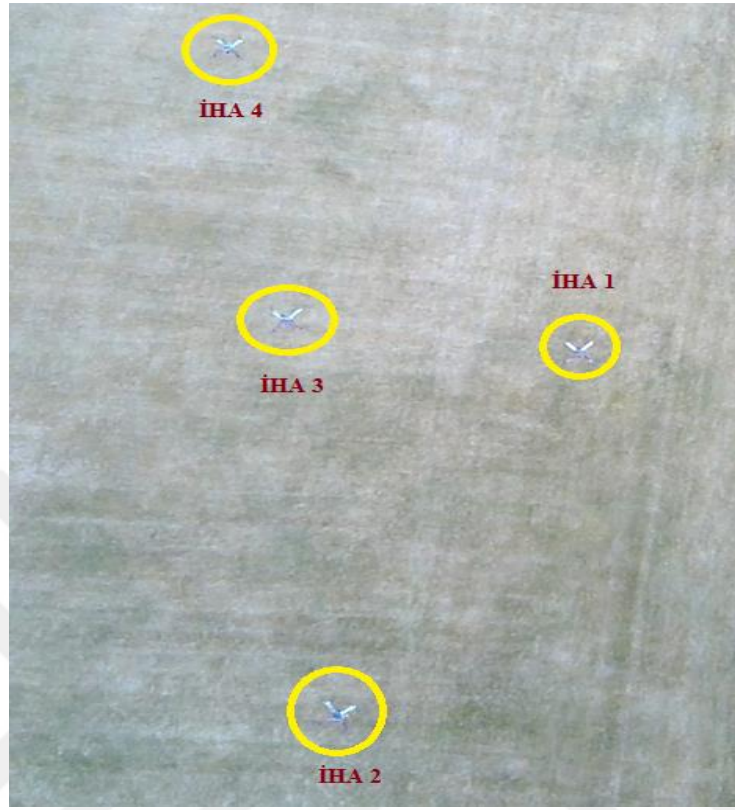
Saha çalışmalarında tüm sistemin kendi aralarında haberleşme sağlayabilmeleri için bir Router aracılığıyla TCP/IP tabanlı yerel ağ kurulmuştur. Oluşturulan yerel ağda, bir adet yer kontrol istasyonu, bir adet Router ve dört adet İHA mevcuttur. Her bir cihaza ait olan IP'ler Tablo 1'de sunulmuştur. Ayrıca, İHA'ların sürü uçuşu için yazılan python tabanlı kodları işlemek için Raspberry Pi kullanılmıştır. Python koduyla tasarlanan sürü yapısı şu şekildedir:

İlk olarak yer kontrol istasyonundan Router aracılığıyla tüm İHA'lar ile iletişim kurulmuştur. Sunucu olarak belirlenen İHA₁ havada oluşturulacak olan sürü görevini diğer İHA'lara göndermektedir (yer kontrol istasyonundan bağımsız olarak İHA'lar kendi aralarında konuşmaktadır). İHA'lar görev bilgilerini sunucu İHA'dan aldıktan sonra ilgili konum bilgilerine giderek formasyon oluşturmaktadırlar. Daha sonra, değişen formasyon şekillerine göre dört İHA sırasıyla; üçgen, eşkenar dörtgen ve hat düzeninde formasyon gerçekleştirmiştir. Ayrıca, İHA'ların saha testinde gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri ve mesafe bilgileri Şekil 36'daki gibidir.



Şekil 36. İHA'ların saha testinde gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri ve mesafe bilgileri

Şekil 37’de İHA’ların saha testleri sırasında üçgen formasyon uçuşuna ait gerçek zamanlı uçuş görüntüsü verilmiştir. Resimden İHA’ların üçgen formasyonunu başarıyla oluşturdukları görülmektedir.



Şekil 37. İHA’ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen üçgen formasyonuna ait uçuş görüntüsü

Şekil 38’de İHA’ların gerçek zamanlı üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında meydana gelen mesafe değişim bilgileri verilmiştir. Şekilde formasyon başlangıç anında İHA₁ ve İHA₃ arasındaki mesafenin yaklaşık 5 metre civarında olduğu devamında ise, 1 ile 3. saniyeler arasında mesafenin artarak 5.6 metreye çıktığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, 4 ile 7.5’inci saniyeye kadar İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 5 metre olduğu ve devamında ise, İHA’lar arasındaki mesafenin rüzgârdan ve GPS ölçümünden kaynaklı hatalardan dolayı küçük dalgalanmalar ile devam ederek formasyonu 5.4 metre aralığında tamamladıkları görülmüştür.

Şekil 38’de İHA₁ ve İHA₂ için formasyon uçuşunun başlangıç anında İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 16.5 metre olduğu ve devamında ise, İHA’ların aralarındaki mesafeyi hızla azaltarak 8. saniyede yaklaşık 8 metreye kadar düşürdükleri görülmektedir. Ayrıca, İHA’ların arzu edilen formasyon mesafesini sağlamak adına aralarındaki mesafeyi düşürmeye devam ettikleri ve böylece, aralarında yaklaşık 7.2 metrelik mesafede üçgen formasyonunu gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 38’de İHA₁ ve İHA₄’ün formasyon uçuşuna başladıkları anda aralarındaki mesafenin yaklaşık 7 metre civarında olduğu ve devamında ise, bu mesafeyi korudukları görülmüştür. Daha sonra, 10. saniyeden itibaren İHA’lar arasındaki mesafenin bir miktar artış gösterdiği ve üçgen formasyonunu yaklaşık 7.38 metre mesafede tamamladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 38’de İHA₂ ve İHA₃ için formasyon başlangıç anında ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık 20.3 metre olduğu görülmektedir. Ancak, İHA’ların formasyon uçuşuna başladıkları anda aralarındaki mesafenin hızla azaldığı ve 9.5’inci saniyede yaklaşık olarak 5.5 metreye gerilediği görülmektedir. Daha sonra, 10. saniyeden itibaren İHA’ların arzu edilen formasyon düzenini korumak için aralarındaki mesafeyi 5 metrede tutmaya çalıştıkları ancak, saha ortamında mevcut olan rüzgar nedeniyle mesafe aralığının ± 40 cm’lik değişimler içerdiği görülmüştür. Bu nedenle, ilgili İHA’ların üçgen formasyonunu aralarında yaklaşık 5.35 metrelik mesafe olacak şekilde gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 38’de İHA₂ ve İHA₄ için formasyon başlangıç anında ilgili İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 9.7 metre civarında olduğu ve ardından, İHA’ların aralarındaki bu mesafeyi 10. saniyeye kadar korudukları ancak, 10. saniyede aralarındaki mesafe değerinin yaklaşık 10.8 metreye çıktığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, 11. saniyeden itibaren İHA’ların birbirlerine yaklaşarak aralarındaki mesafeyi tekrar yaklaşık 10 metreye düşürdükleri ve böylece, üçgen formasyonunu yaklaşık 30 cm’lik mesafe hatası ile tamamladıkları görülmektedir.

Şekil 38’de İHA₃ ve İHA₄ için formasyon uçuşuna başlamadan önce aralarındaki mesafenin yaklaşık 11 metre civarında olduğu ve devamında ise, İHA’ların birbirlerine yaklaşarak formasyon mesafesini 8. saniyede 7 metre civarına düşürdükleri görülmüştür. Daha sonra, İHA’lar küçük adımlarla birbirlerine yaklaşmaya devam ederek 15. saniyede aralarındaki mesafeyi yaklaşık 5 metre civarına düşürdükleri ve böylece, üçgen formasyonunu yaklaşık 37 cm’lik mesafe hatası ile tamamladıkları görülmektedir.

Şekil 39’da, İHA’lar arasında üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe hataları sunulmuştur. İlgili hata verileri $e_{ij} = x_i - x_j - \delta_{ij}$ ifadesi ile elde edilmiştir. Bu eşitlikten komşu iki İHA arasında δ_{ij} kadar bir referans mesafe oluşturularak arzu edilen formasyon düzeni sağlanmaktadır. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ve İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon uçuşuna başladıkları anda ilgili İHA’lar arasındaki hata değerinin yaklaşık 0.4 metre civarında olduğu devamında ise, 1. saniyeden itibaren birbirlerinden hafif uzaklaşmaları nedeni ile hata değerinin artarak yaklaşık 0.5 metreye ulaştığı görülmüştür. Ardından, 3. saniyeden itibaren hata değerinin

azalmaya başladığı ve 4. saniyede yaklaşık sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının saha testleri sırasında oluşan rüzgârdan kaynaklı olarak 8 ile 13. saniyeler arasında yaklaşık 1 metreye çıktığı ancak devamında, İHA'ların tekrar birbirlerine yaklaşıp yaklaşık 35 cm'lik mesafe hatası ile arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 39'da turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 9.5 metre civarında olduğu ve devamında ise, İHA'ların arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için birbirlerine yaklaştıkları ve böylece, hata değerinin 8.5'inci saniyede yaklaşık 0.3 metre değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'ların üçgen formasyonunu oluşturmak için aralarındaki mesafeyi korumaya çalıştıkları ancak rüzgârdan kaynaklı bozucu etkiden dolayı mesafe hatasının dalgalı formda olduğu görülmüş ve İHA'ların yaklaşık 0.35 metrelik hata ile arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

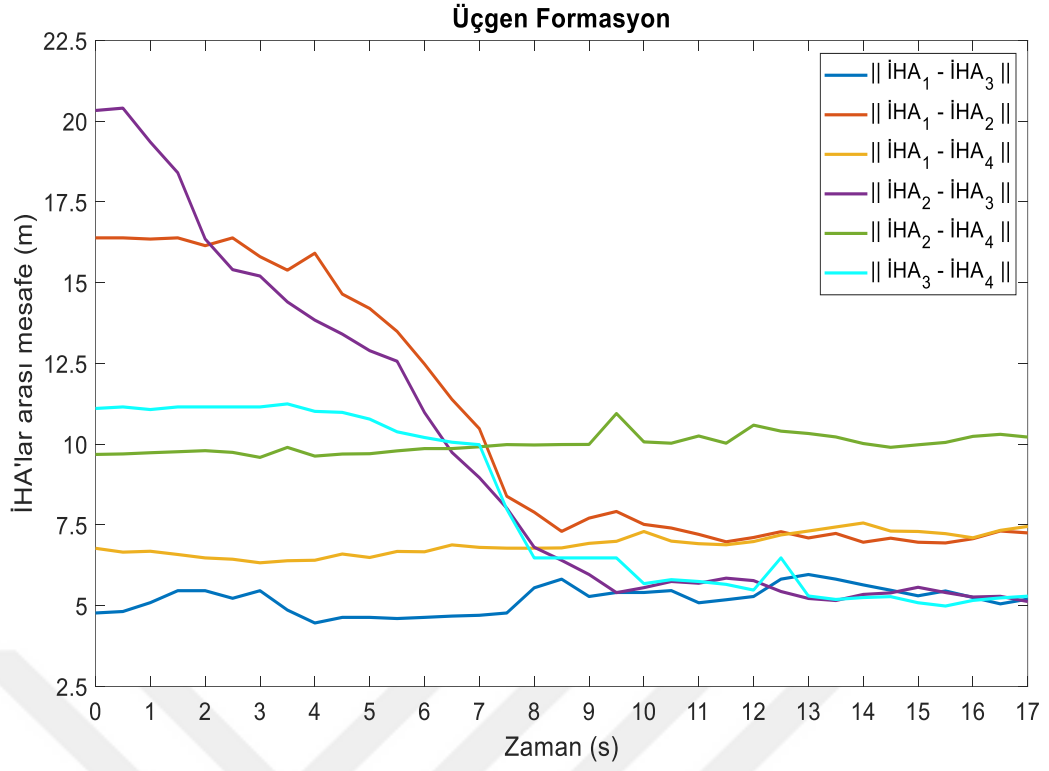
Şekil 39'da sarı renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 0.45 metre olduğu ve devamında ise, formasyon uçuşu boyunca İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ± 0.4 metre aralığında değiştiği görülmüş ve İHA'ların bu hata değeri ile üçgen formasyonunu oluşturdıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 39'da mor renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 15.5 metre olduğu ve sonrasında, İHA'ların arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için birbirlerine hızla yaklaşıp aralarındaki mesafe hatasını düşürdükleri ve 9. saniyede hata değerinin yaklaşık 0.45 metre değerine gerilediği gözlemlenmiştir. Devamında, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatası 10 ile 13. saniyeler arasında hafif artış gösterse de İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.42 metrelik hata ile gerçekleştirdikleri görülmüştür.

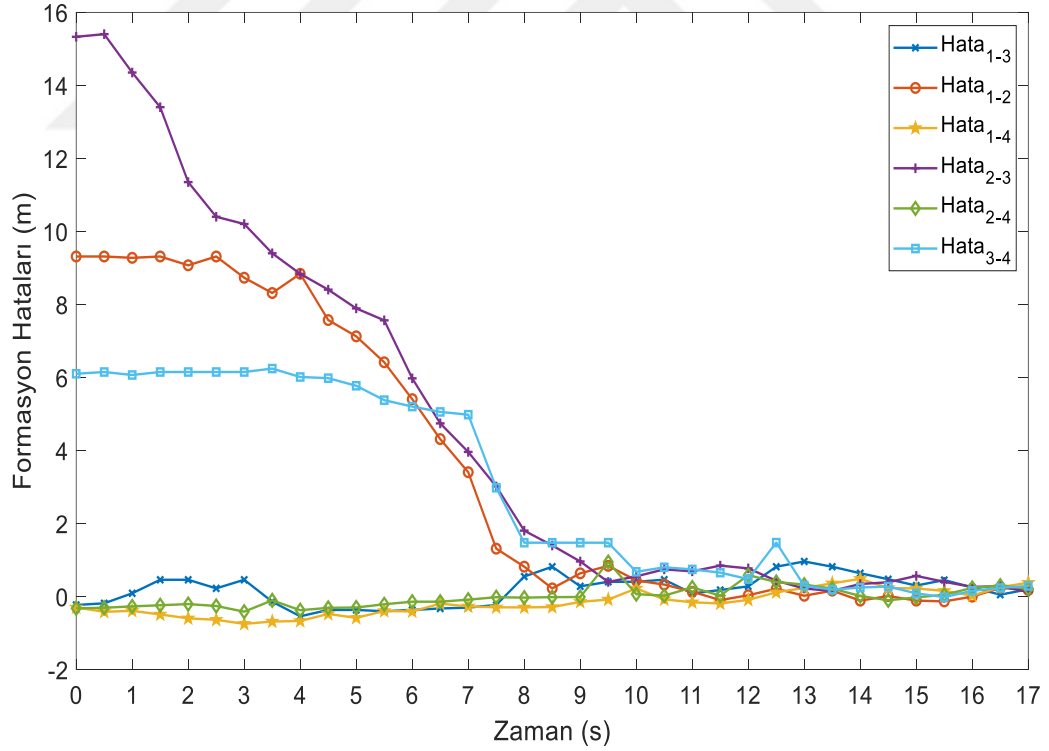
Şekil 39'da yeşil renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 0.3 metre olduğu ve hata değerinin 9. saniyeye kadar bu değerde kaldığı görülmüştür. Ardından, 9 ile 10. saniyeler arasında hata değerinin aniden 1.35 metreye çıktığı ve devamında, İHA'ların komşuluklarını kullanarak birbirlerine yakınsadıkları ve böylece, mesafe hatasını yaklaşık 0.4 metreye düşürerek arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 39’da turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında İHA’lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 6 metre olduğu devamında ise, İHA’ların birbirlerine yaklaşarak mesafe hatasını 8. saniyede yaklaşık 1.8 metre civarına indirdikleri ve bu mesafe hatasını 9.5’inci saniyeye kadar korudukları gözlemlenmiştir. Sonrasında, ilgili İHA’lar arasındaki formasyon hatasının dalgalı bir seyir izleyerek azaldığı ve yaklaşık 0.45 metre hata ile üçgen formasyonunun oluşturulduğu gözlemlenmiştir.

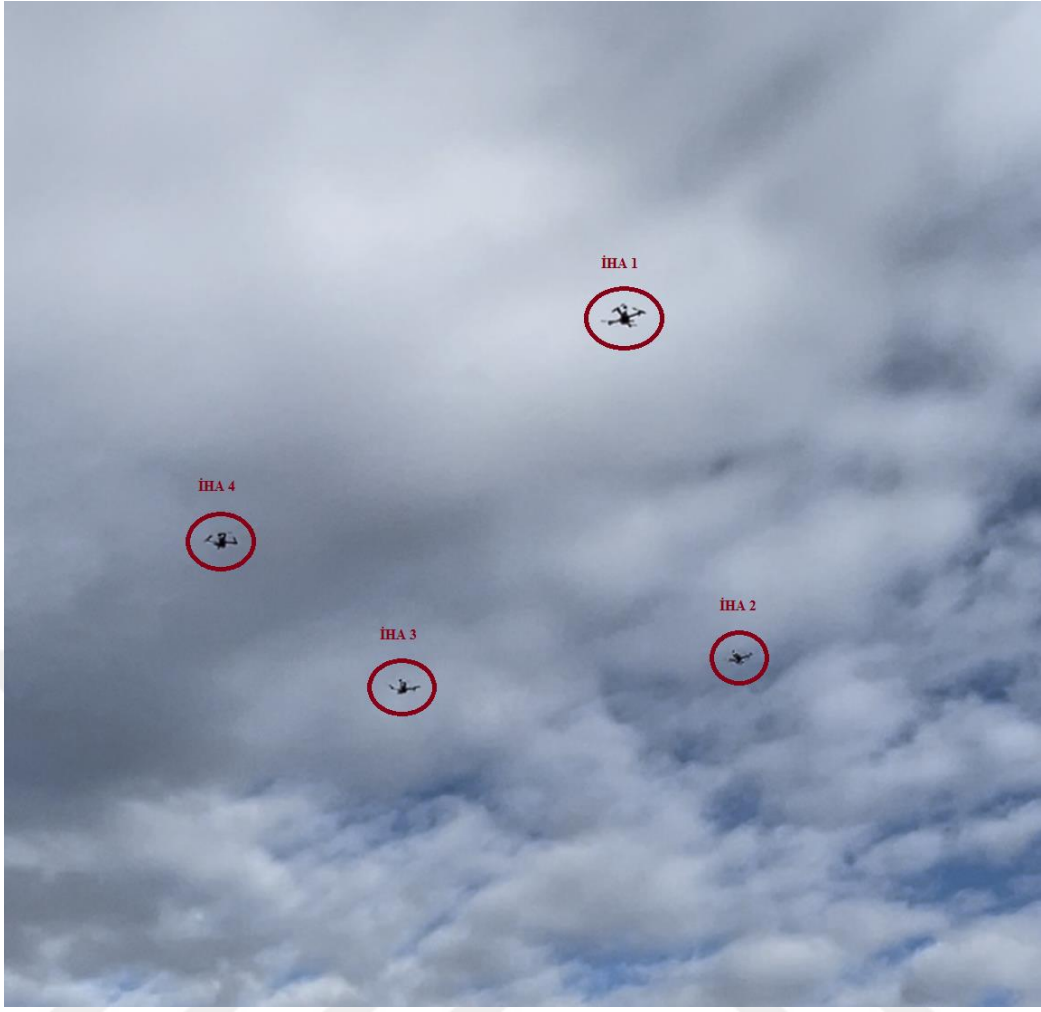




Şekil 38. İHA'ların gerçek zamanlı üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri



Şekil 39. İHA'ların gerçek zamanlı üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri



Şekil 40. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen eşkenar dörtgen formasyon uçuş görüntüsü

Şekil 40'da İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde eşkenar dörtgen formasyonu için elde edilen uçuş görüntüsü sunulmuştur. Ayrıca, saha testleri sırasında havanın oldukça rüzgârlı olmasına karşın, önerilen GKTFK ile İHA'ların eşkenar dörtgen formasyonunu başarıyla oluşturdıkları görülmüştür.

Şekil 41'de eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında İHA'lar arasında oluşan mesafe değişim bilgileri verilmiştir. Şekilde koyu mavi renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ile İHA₃ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. İlgili İHA'ların başlangıç anında aralarındaki mesafenin yaklaşık olarak 5.5 metre olduğu ve devamında, İHA'ların birbirlerinden uzaklaşarak aralarındaki mesafeyi arttırdıkları ve 7.5'inci saniyede yaklaşık 11 metreye çıkardıkları gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'ların arzu edilen formasyon mesafesini sağlamak adına aralarındaki mesafeyi 12. saniyede yaklaşık 10 metreye düşürdükleri görülse de, eşkenar dörtgen formasyonunu 10.37 metre mesafede gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 41’de turuncu renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ile İHA₂ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 7.5 metre olduğu devamında, İHA’ların birbirlerinden uzaklaşmaları nedeniyle aralarındaki mesafenin artarak 1.5’inci saniyede yaklaşık 9.6 metreye çıktığı görülmüştür. Sonrasında ise, İHA’lar arasındaki mesafe azalarak 2.5’inci saniyede yaklaşık 8 metreye gerilediği ve 10. saniyeye kadar mesafe değerinin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Ardından, İHA’lar arasındaki mesafenin 12.5’inci saniyede yaklaşık 7 metreye gerilese de, araçlar formasyonu yaklaşık 0.45 metrelik hata değeri ile gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 41’de sarı renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ile İHA₄ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. İlgili İHA’lar arasındaki başlangıç mesafesinin yaklaşık 7.5 metre olduğu devamında, 2.5’inci saniyede yaklaşık 9.8 metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA’ların arzu edilen formasyonu sağlamak için aralarındaki mesafeyi azaltarak 7.5’inci saniyede yaklaşık 9 metreye indirdikleri ve devamında ise, 12.5’inci saniyede 7 metrenin altına gerilediği gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA’ların arzu edilen formasyon düzenini sağlamak için ileri yönlü hareket ettikleri ve bu nedenle, aralarındaki mesafeyi yaklaşık 7.32 metreye çıkardıkları ve formasyonu bu mesafede tamamladıkları görülmüştür.

Şekil 41’de mor renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₂ ile İHA₃ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık 5.6 metre olduğu devamında, 6. saniyede mesafenin yaklaşık 8.4 metreye çıktığı görülmüştür. Sonrasında, İHA’ların eşkenar dörtgen formasyonunu oluşturmak için aralarındaki arzu edilen mesafeyi sağlamak adına birbirlerine yaklaştıkları ve 8. saniyede mesafeyi yaklaşık 7.2 metreye düşürdükleri ve devamında, mesafe değeri hafif değişim göstererek İHA’ların formasyonu yaklaşık 7.47 metrede tamamladıkları görülmüştür.

Şekil 41’de yeşil renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₂ ile İHA₄ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. Formasyon uçuşuna başladıkları anda ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık 10 metre civarında olduğu ve devamında ise, araçlar arasındaki mesafenin hafif dalgalanmalar ile devam ettiği görülmüştür. Sonrasında, 10. saniyeden itibaren İHA’ların ± 0.25 metre dalgalanmalar ile formasyonun tamamlandığı görülmüştür.

Şekil 41’de turkuaz rengi ile verilen mesafe bilgileri İHA₃ ile İHA₄ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık 5.7 metre olduğu ve devamında ise, 3. saniyeye kadar mesafenin artış göstererek yaklaşık 7 metreye çıktığı görülmüştür. Sonrasında, dış ortamda gerçekleştirilen formasyon uçuşu sırasında İHA’ların rüzgardan etkilenmeleri nedeniyle aralarındaki mesafeyi sabit tutmakta zorlandıkları görülmüştür. Ancak, İHA₃ ile İHA₄’ün eşkenar dörtgen formasyonunu gerçekleştirmek için aralarındaki mesafeyi 14.5’inci saniyede 7.1 metreye düşürdükleri ve devamında ise, 7.3 metre mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 42’de, eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında İHA’lar arasında meydana gelen mesafe hataları sunulmuştur. İlk olarak koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon uçuşuna başladıkları anda ilgili İHA’lar arasındaki mesafe hatasının yaklaşık 4.5 metre olduğu devamında ise, İHA’ların birbirlerinden uzaklaşmaları sonucunda mesafe hatasının 7. saniyede sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Ardından, ilgili İHA’lar arasındaki hata değerinin 9. saniyeye kadar artarak yaklaşık 1 metreye çıksa da devamında, İHA’ların tekrar birbirlerine yaklaşarak hata değerini 11. saniyede sıfıra düşürdükleri ve formasyonu yaklaşık 0.35 metrelik bir hata ile tamamladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 42’de turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA’ların formasyon başlangıç anında aralarındaki mesafe hatasının yaklaşık 0.4 metre olduğu ve devamında, hata değerinin artarak 1.5’inci saniyede yaklaşık 2.8 metreye çıktığı görülmüştür. Sonrasında, İHA’ların birbirlerine yakınsamasıyla mesafe hatasının 2.5’inci saniyede yaklaşık 1 metre düzeyine gerilediği ve ardından, hata değerinin 6.5’inci saniyeye kadar sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, mesafe hatası her ne kadar bir miktar azalsa da, 8.5’inci saniyede tekrar 1 metrenin üzerine çıktığı görülmüş ancak, 10. saniyede azalarak İHA’lar arasındaki formasyon mesafe hatasının yaklaşık 0.45 metrede son bulduğu gözlemlenmiştir.

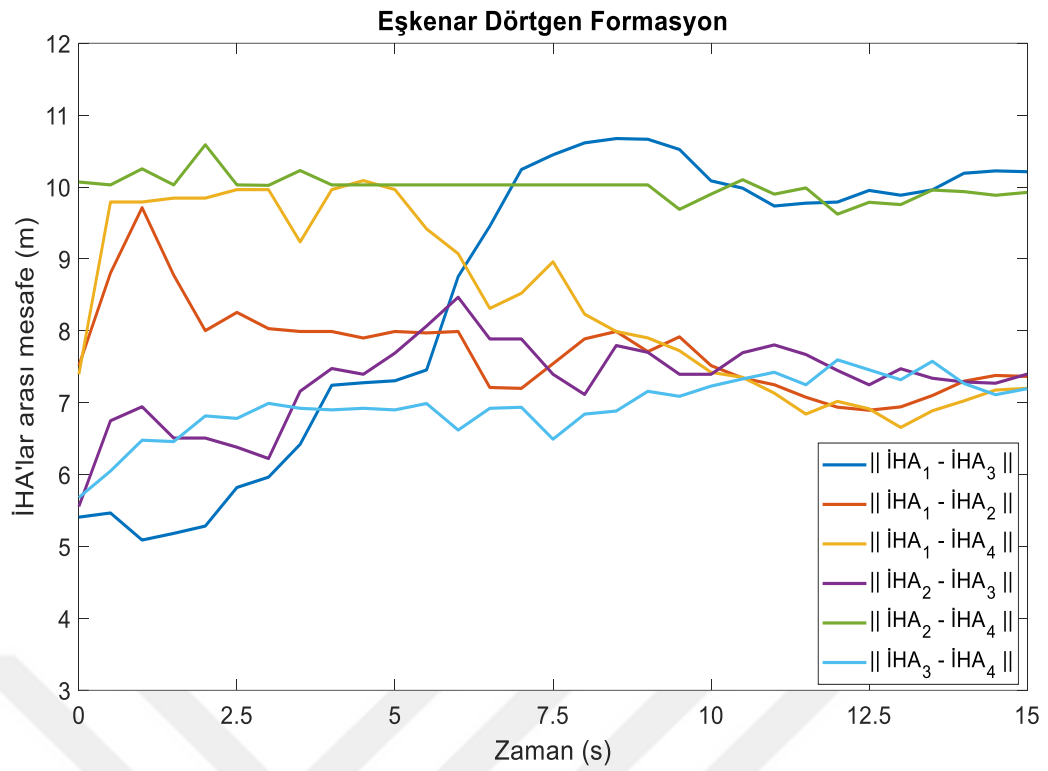
Şekil 42’de sarı renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Başlangıç anında İHA’lar arasındaki mesafe hatasının yaklaşık 0.3 metre olduğu devamında ise, hata değerinin artarak 1. saniyede yaklaşık 2.6 metreye çıktığı ve 3. saniyeye kadar hata değerinin bu genlikte sabit kaldığı görülmüştür. Sonrasında, mesafe hatasının 5. saniyeden itibaren azalarak 7. saniyede yaklaşık 1.2 metreye gerilediği ancak, çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesiyle, hata değerinin tekrar yükselerek 7.5’inci saniyede yaklaşık 2 metreye çıktığı görülmüştür. Devamında ise, İHA’lar arasındaki

mesafe hatasının azaldığı ve İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.33 metre hata ile sonlandırdıkları görülmüştür.

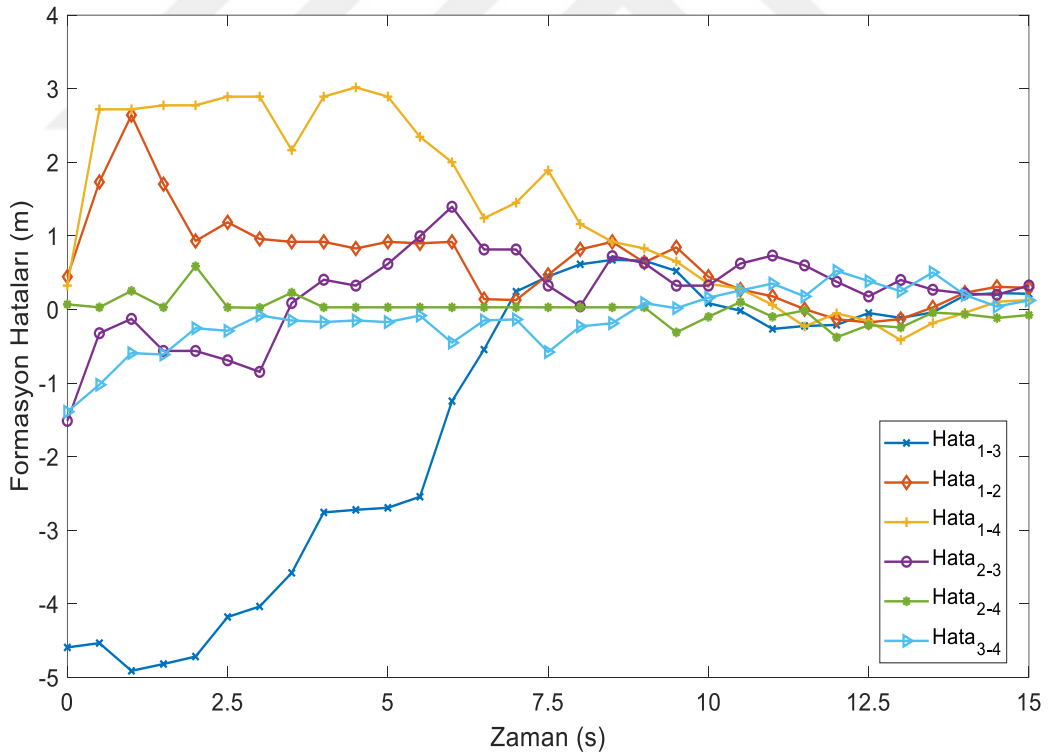
Şekil 42'de mor renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arası mesafe hatasının yaklaşık 1.5 metre olduğu ve devamında, İHA'ların birbirlerinden uzaklaşarak mesafe hatasını sıfıra yakınsadığı ve 1.5'inci saniyede İHA'lar arası mesafenin azalmasıyla hata değerinin de azaldığı görülmüştür. Sonrasında, 3.5'inci saniyede İHA'lar arası mesafe hatasının yaklaşık sıfıra yakınsadığı ve devamında ise, 6. saniyede hata değerinin tekrar artarak yaklaşık 1.4 metreye çıktığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, İHA'lar arasındaki mesafe hatasının 6. saniyeden itibaren tekrar azalarak 8. saniyede yaklaşık 0.3 metreye gerilediği ancak, formasyon oluşumu sağlandıktan sonra İHA'lar arasındaki mesafe hatasının hafif salınımlarla yaklaşık 0.45 metrede son bulduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 42'de yeşil renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 0.2 metre olduğu ve 2 ile 2.4'üncü saniyeler arasında çarpışmadan kaçınma algoritmasının devreye girmesi nedeni ile, hata değeri artarak yaklaşık 0.6 metre düzeyine yükseldiği görülmüştür. Ancak, formasyon uçuşu boyunca ilgili İHA'lar arasındaki hata değerinin çok fazla değişmediği, yaklaşık 9. saniyeye kadar 0.2 metre düzeyinde sabit kaldığı gözlemlenmiş ve İHA'ların formasyonu bu hata değerinde tamamladıkları görülmüştür.

Şekil 42'de turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının yaklaşık 1.4 metre olduğu ardından, İHA'ların birbirlerinden uzaklaşarak hata değerinin 2.5'inci saniyede yaklaşık sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Ardından, 6. saniyeye kadar mesafe hatasının yaklaşık sıfır değerine yakın seyrettiği devamında ise, 6.5 ile 8.5'inci saniyeler arasında İHA'ların birbirlerine yaklaşması nedeni ile hatanın 0.5 metre değerine çıktığı görülmüştür. Daha sonra, 9. saniyeden itibaren hata değerinin artarak 11. saniyede yaklaşık 0.4 metre düzeyine çıktığı ve ilgili İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.33 metre hata değeri ile tamamladıkları görülmüştür.



Şekil 41. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri



Şekil 42. İHA'ların gerçek zamanlı eşkenar dörtgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri

Şekil 43'te İHA'ların hat düzeni için gerçekleştirdikleri gerçek zamanlı saha testine ait uçuş görüntüsü verilmiştir. Hat formasyonu, eşkenar dörtgen formasyon uçuşunun ardından gerçekleştirilmiştir. Böylece, konsensüs tabanlı formasyon kontrolcüsü ile birlikte kullanılan yörünge takip algoritmasının da çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 43. İHA'ların saha testlerinde elde edilen hat formasyon uçuş görüntüsü

Şekil 44'te hat formasyon uçuşu sırasında İHA'lar arasında oluşan mesafe bilgileri verilmiştir. Şekilde koyu mavi renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ve İHA₃ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'ların formasyon uçuşuna başladıkları anda aralarındaki mesafenin yaklaşık olarak 10 metre olduğu ve İHA'ların 3. saniyeye kadar bu mesafeyi korudukları ve devamında ise, İHA'ların birbirlerine yaklaşmaları nedeni ile mesafenin azalarak 7. saniyede yaklaşık 4 metreye gerilediği gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'ların arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için aralarındaki mesafeyi tekrar artırarak 12. saniyede yaklaşık 5.6 metreye çıkardıkları ve devamında, ilgili İHA'ların hat formasyonunu 5.45 metre mesafede sonlandırdıkları görülmüştür.

Şekil 44'te turuncu renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ile İHA₂ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafesinin yaklaşık 7.6 metre olduğu görülmektedir. Ardından, İHA'ların arzu edilen formasyonu gerçekleştirebilmeleri için aralarındaki mesafeyi arttırdıkları ve 6. saniyede yaklaşık 10 metreye çıkardıkları ve devamında ise, 10. saniyeye kadar bu mesafeyi korudukları görülmüştür. Sonrasında, havadaki rüzgâr nedeniyle İHA'ların

sabit durmakta zorlandıkları ve ilgili formasyonu yaklaşık 0.5 metrelik hata ile gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 44'te sarı renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₁ ile İHA₄ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. İlgili İHA'ların formasyon başlangıç anında aralarındaki mesafenin yaklaşık 7.4 metre civarında olduğu ve devamında, İHA'ların arzu edilen formasyonu gerçekleştirmek için birbirlerine yakınsadıkları ve böylece, İHA'lar arası mesafenin 6. saniyede yaklaşık 5 metreye gerilediği görülmüştür. Sonrasında, İHA'lar arasındaki mesafenin 10. saniyeye kadar 5 metre civarında sabit kaldığı ve ardından, 11. saniyeden itibaren küçük mesafe değişimleri ile formasyon mesafesinin yaklaşık 5.5 metrede sonlandığı görülmüştür.

Şekil 44'te mor renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₂ ile İHA₃ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. İlgili İHA'ların formasyon başlangıç anında aralarındaki mesafenin yaklaşık 7.45 metre olduğu ardından, 2. saniyede mesafenin yaklaşık 8.2 metreye yükseldiği ve devamında ise, İHA'lar arasındaki mesafenin küçük değişimler göstererek 4. saniyede tekrar 7 metreye gerilediği görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe değerinin 8. saniyeye kadar yaklaşık 7 metre civarında sabit kaldığı ve ardından, mesafe değerinin 10. saniyeye kadar azalarak 6 metrenin altına gerilediği görülmüştür. Sonrasında, 10. saniyeden sonra iki İHA arasındaki formasyon mesafesinin küçük salınımlarla 5.35 metreye gerilediği ve bu değerde formasyonun gerçekleştirildiği görülmüştür.

Şekil 44'te yeşil renk ile verilen mesafe bilgileri İHA₂ ile İHA₄ formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arası mesafenin yaklaşık 10 metre olduğu ve devamında, İHA'ların bu mesafeyi yaklaşık 4 saniye boyunca korudukları görülmüştür. Sonrasında ise, İHA'ların 4. saniyeden itibaren birbirlerinden uzaklaştıkları ve bu nedenle aralarındaki mesafenin de artarak 7. saniyede yaklaşık 15 metreye çıktığı görülmüştür. Bununla birlikte, ilgili İHA'lar arası mesafenin küçük artışlar göstererek formasyon mesafesinin 15.4 metre civarında sonlandığı ve İHA'ların bu mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 44'te turkuaz rengi ile verilen mesafe bilgileri İHA₃ ile İHA₄ arasında formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimini göstermektedir. İlgili İHA'lar arası mesafenin başlangıç anında yaklaşık 7.3 metre civarında olduğu ve ardından, İHA'ların formasyon konumlarına gitmek için birbirlerinden uzaklaşmaları sonucu mesafe değerinin de artarak 1.7'inci saniyede yaklaşık 14 metre civarına yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonrasında, ilgili İHA'lar arasındaki mesafenin azalarak 5. saniyede yaklaşık 8.5 metre değerine gerilediği

ve 7.5'inci saniyeye kadar bu mesafe değerin korunduğu görülmektedir. Ardından, İHA'lar arası mesafenin tekrar artarak 11. saniyede yaklaşık 11 metreye yaklaştığı ve devamında ise, İHA'ların bu mesafeyi koruyarak yaklaşık 10.4 metre civarında formasyonu tamamladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 45'te, İHA'lar arasında hat formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe hataları sunulmuştur. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon uçuşuna başladıkları anda ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının yaklaşık 5 metre olduğu ve devamında, İHA'lar arasındaki mesafe hatasının 3. saniyeye kadar hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA'ların birbirlerine yaklaşmasıyla birlikte hata değerin de azalarak 5.5'inci saniyede sıfır değerine yakınsadığı ve devamında, 5 ile 10. saniyeler arasında İHA'ların birbirlerine referans formasyon mesafesinden daha yakın olmaları nedeni ile hata değerin ilgili saniyeler arasında 1 metreye çıktığı ve 10. saniyede tekrar sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, mesafe hatasının küçük salınımlar yaparak ilgili İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.35 metrelik hata ile sonlandırdıkları görülmüştür.

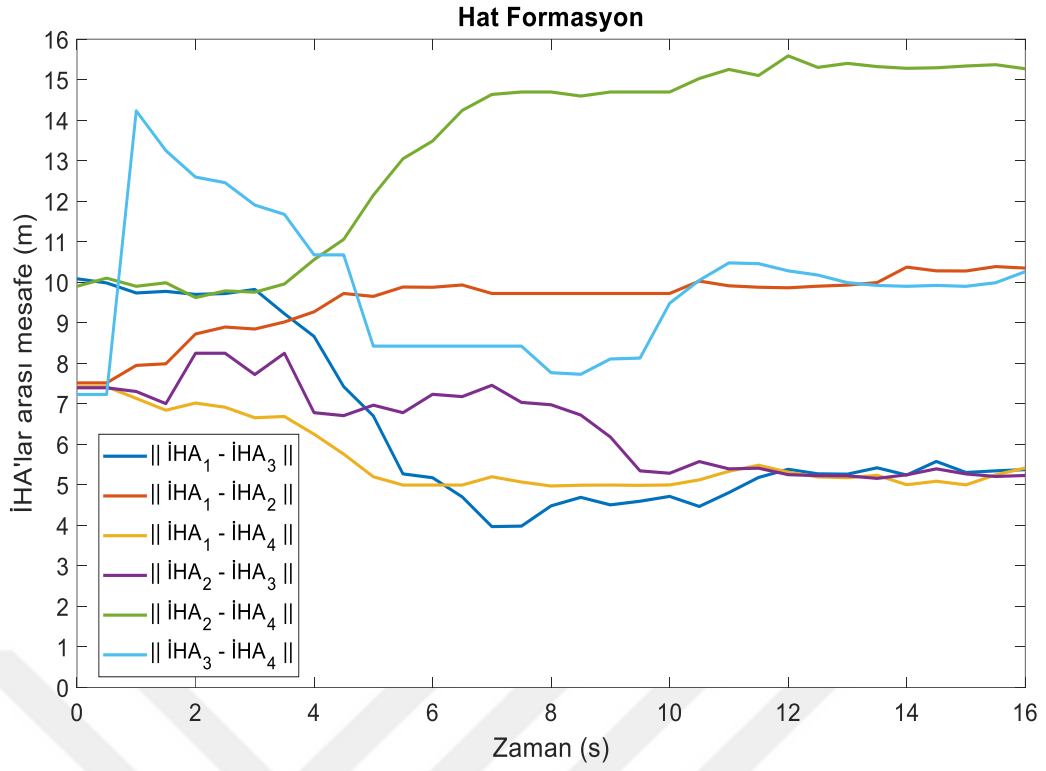
Şekil 45'te turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının yaklaşık 2.1 metre değerinde olduğu görülmektedir. Sonrasında, ilgili İHA'ların birbirlerinden uzaklaşmaları nedeni ile hata değerin de azaldığı ve 6. saniyede sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, İHA'ların aralarındaki mesafeyi korumaya çalıştığı ve böylece hata değerin 0 ile 0.4 metre aralığında salınım yaparak formasyonun sonlandırıldığı görülmüştür.

Şekil 45'te sarı renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının formasyon başlangıç anında yaklaşık 2.1 metre olduğu ve devamında, İHA'ların birbirlerine yaklaşımlarıyla birlikte hata değerin de azalarak 5. saniyede sıfıra yakınsadığı görülmüştür. Sonrasında, iki İHA arasındaki formasyon hatasının 10. saniyeye kadar değişmediği ve devamında ise, küçük sapmalar ile İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.45 metrelik hata değeri ile sonlandırdıkları görülmüştür.

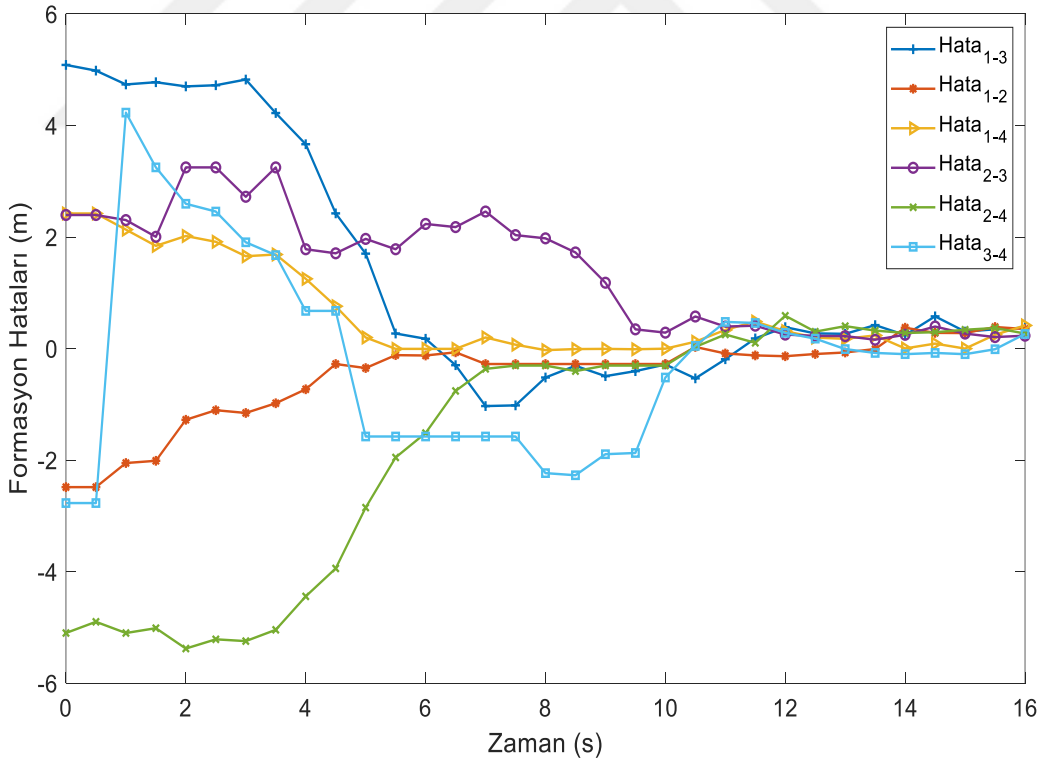
Şekil 45'te yeşil renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki formasyon hata değerin başlangıç anında yaklaşık 5 metre olduğu ve devamında, İHA'ların formasyon mesafesini sağlamak için birbirlerinden uzaklaşmaları nedeni ile, hata değerin 6. saniyede sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir. Sonrasında, İHA'lar arasındaki hata değerin 10. saniyeye kadar oldukça

düşük genlikte olsa da, 10 ile 16. saniyeler arasında küçük değişimlerle birlikte 0.4 metre değerine kadar yükseldiği ve devamında ise, İHA'ların 0.4 metre hata ile formasyonu sonlandırdıkları görülmüştür.

Şekil 45'te turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının yaklaşık 2.3 metre civarında olduğu ve devamında ise, İHA'ların formasyonu sağlamak adına birbirlerinden uzaklaşmaları nedeni ile, mesafe hatasının önce azaldığı ardından, hata değerinin 1.7'inci saniyede yaklaşık 4 metreye yükseldiği görülmüştür. Sonrasında ise, ilgili İHA'ların hatayı azaltmak için tekrar birbirlerine yaklaşmaları nedeni ile önce hata değerinin azalarak 5. saniyede sıfıra yakınsadığı ve devamında, 5 ile 7.5'inci saniyeler arasında yaklaşık 1.85 metreye gerilediği görülmüştür. Bununla birlikte, İHA'ların tekrar formasyon düzenini sağlamak için birbirlerinden uzaklaşmaları nedeni ile, hata değerinin önce sıfıra yakınsadığı ve devamında ise, 0.55 metreye yükseldiği ve 12 ile 16. saniyeler arasında ise küçük değişimler göstererek İHA'ların yaklaşık 0.4 metre hata ile formasyonu sonlandırdıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 44. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen hat formasyon uçuşu sırasında aralarındaki mesafe bilgileri

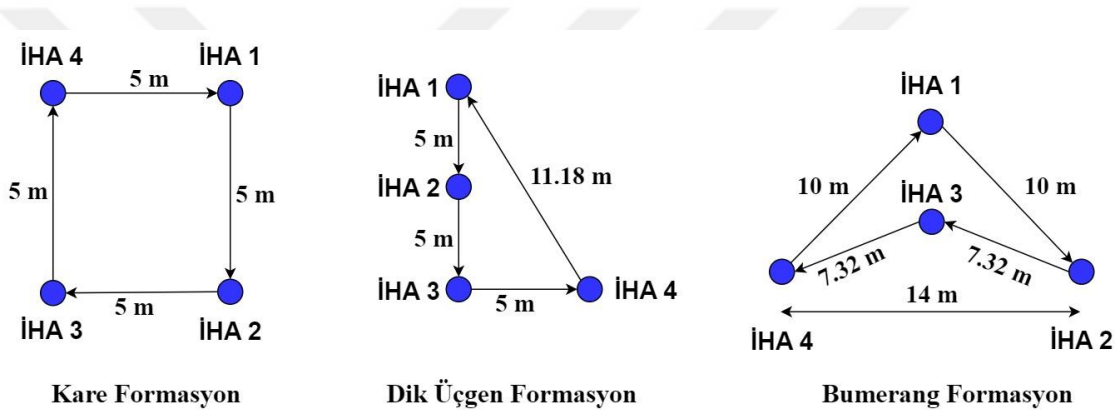


Şekil 45. İHA'ların hat formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri

AGKTFK yöntemine ait deneysel sonuçlar

Tezin bu bölümünde, AGKTFK algoritması kullanılarak üç farklı formasyon şekli için elde edilen gerçek zamanlı test sonuçları sunulmuştur. Formasyon kontrolü için önerilen kontrol yapısının parametreleri LME ile elde edilmiştir. Bu hesaplamalar sırasında sistem durum matrisi ve kontrol girdi matrisi $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ olarak alınmıştır. Ardından, adaptif formasyon kontrolcüsünün sahip olduğu parametre değerleri $\Gamma = \begin{bmatrix} 1.8850 & 3.012 \\ 3.012 & 1.7099 \end{bmatrix}$; $K = I_N \otimes [-0.9852 \quad -1.0723]$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 46'da İHA'ların gerçek zamanlı saha çalışmaları sırasında gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri verilmiştir. Oluşturulan tüm formasyon komşulukları yönlü ve bağlı graf yöntemi ile oluşturulmuş ve formasyon uçuşları da bu yöntem aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 46. İHA'ların gerçek zamanlı saha çalışmalarında gerçekleştirdikleri formasyon şekilleri

Formasyon uçuşu için ilk olarak kare formasyon düzeni tasarlanmıştır. Kare formasyonunda her bir İHA arası mesafe 5 metre olacak şekilde oluşturulmuştur. Kare formasyonunda amaç her bir İHA'nın konumuna doğru bir şekilde gelerek kenar uzunluğu eşit olan kare şeklini oluşturmalarıdır. İkinci olarak dik üçgen formasyon şekli oluşturulmuştur. Bu formasyonda İHA₁ - İHA₂; İHA₂ - İHA₃ ve İHA₃ - İHA₄ arasında 5 metre; İHA₁ - İHA₄ arasında ise 11.18 metre olacak şekilde referans aralıklar belirlenmiştir. Böylece İHA'ların kare formasyonundan sonra aralarındaki yönlü graf sayesinde dik üçgen formasyon şeklini alması amaçlanmıştır. Dik üçgen formasyonunda amaç; İHA'ların açık alanda özellikle hem hat düzeni sağlamaları hem de köşe noktasını düzgün bir şekilde oluşturabildiklerini gözlemlemektir. Son olarak bumerang formasyon şekli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu formasyonda İHA₁ - İHA₂ ve İHA₁ - İHA₄ arası 10 metre; İHA₂ - İHA₃ ve İHA₃ - İHA₄ arası ise 7.32 metre olarak belirlenmiştir. Bumerang formasyonu köşeli ve nispeten diğer formasyon şekillerine göre daha esnek bir görünüme sahip olduğundan önerilen kontrol yönteminin performansını test etmek amacıyla kullanılmıştır.

Şekil 47’de İHA’ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen kare formasyonuna ait uçuş görüntüsü sunulmuştur. Açık alanda yapılan formasyon testi sırasında havanın rüzgarlı olmasına rağmen İHA’ların kare formasyonunu başarıyla gerçekleştirdikleri görülmüştür.



Şekil 47. İHA’ların saha testlerinde elde edilen kare formasyonuna ait uçuş görüntüsü

Şekil 48’de İHA’ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe değişim bilgileri verilmiştir. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlk anda ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık 5 metre civarında olduğu görülmüş ve bu mesafe yaklaşık 5.5 saniye boyunca korunmuştur. Devamında ise, 6. saniyede İHA’lar arasındaki mesafe 6.5 metreye yaklaşmış ve 8. saniyeye kadar 6.5 ile 5.5 metre arası mesafede formasyon uçuşuna devam etmişlerdir. Sonrasında, 8. saniyeden itibaren ilgili İHA’lar arası mesafe artmış ve son olarak yaklaşık 7.45 metre civarında kare formasyonu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 48’de turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlk anda ilgili İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 14 metre civarında olduğu görülmektedir. Ardından, kare formasyonunu oluşturmak için ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin 9. saniyeye kadar yaklaşık 7.5 metreye kadar düştüğü, son anda ise yaklaşık 5.36 metre civarında durduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 48’de sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA’lar arasındaki mesafenin ilk anda 9 metre civarında olduğu ve yaklaşık 8.5’inci saniyeye kadar hızla

azalarak 7 metrenin altına kadar gerilediği gözlemlenmiştir. Ardından, kare formasyonunu oluşturmak için 8.5'inci saniyeden itibaren bu iki İHA arası mesafenin yaklaşık 5.35 metre civarında durduğu görülmüştür.

Şekil 48'de mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin ilk anda 22 metre civarında olduğu ve yaklaşık 10. saniyeye kadar aralarındaki bu mesafeyi hızla azaltarak yaklaşık 5.5 metreye düşürdükleri görülmüştür. Sonrasında, 11. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arasındaki mesafenin azalarak yaklaşık 5.40 metreye kadar gerilediği ve bu mesafe ile kare formasyonunu gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 48'de yeşil renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafenin yaklaşık 19 metre civarında olduğu ve 10. saniyeye kadar aralarındaki bu mesafeyi azaltarak yaklaşık 7.5 metreye düşürdükleri görülmüştür. Ardından, 11. saniyeden itibaren İHA₂ ile İHA₄ arasındaki mesafenin hafif salınımlar ile 7.4 metre civarında sabit kaldığı gözlemlenmiş ve İHA'lar bu mesafe ile kare formasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Son olarak Şekil 48'de turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında kare formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafenin yaklaşık 10 metre olduğu ve 9. saniyede ilgili İHA'lar arası mesafenin yaklaşık 5.5 metreye gerilediği görülmüştür. Daha sonra, ilgili İHA'lar 10. saniyeden itibaren aralarındaki mesafeyi azaltarak yaklaşık 5.35 metreye kadar düşürdükleri ve bu noktada kare formasyonunu başarıyla oluşturdukları gözlemlenmiştir.

Şekil 49'da İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri sunulmuştur. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Bu iki İHA arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 2.5 metre civarında olduğu ve bu hata değerinin yaklaşık 5.5'inci saniyeye kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Daha sonra, 6. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arası mesafe hatası ilk anda sıfıra yakınsasa da, devamında ise yaklaşık 8.5'inci saniyeye kadar dalgalı bir seyir izleyerek 0 ile 2 metre arasında hata değerleri olduğu görülmektedir. Ancak mesafe hatasının 17. saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

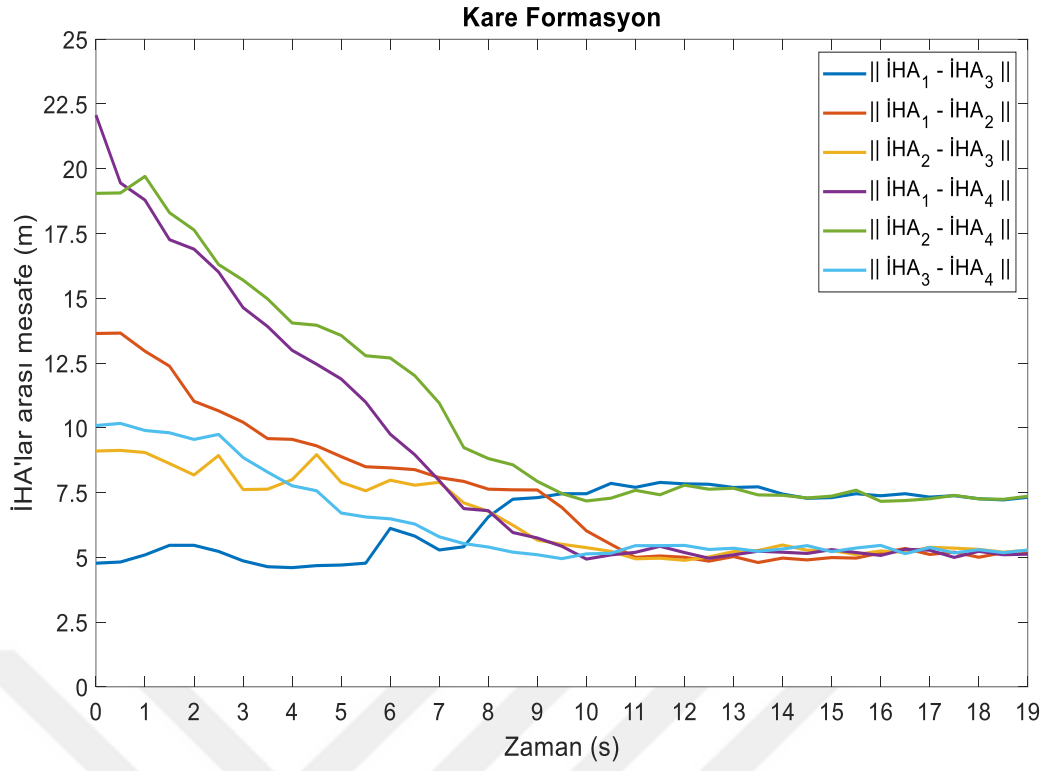
Şekil 49'da turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin ilk anda yaklaşık 8.5 metre olduğu görülmektedir. Daha sonra, 2. saniyede mesafe hatasının yaklaşık 6 metreye kadar azaldığı ve 8. saniyede yaklaşık 3 metreye kadar düştüğü ve son olarak 11. saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 49'da sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Kare formasyonuna başlarken ilgili İHA'lar arası mesafe hatasının yaklaşık 4 metre civarında olduğu görülmektedir. İlerleyen adımlarda ise özellikle 2 ile 7. saniyeler arasında ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının 3.5 ile 4.5 metre arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ardından, 7. saniyeden sonra mesafe hata değeri azalarak arzu edilen sıfır değerine yakınsamıştır.

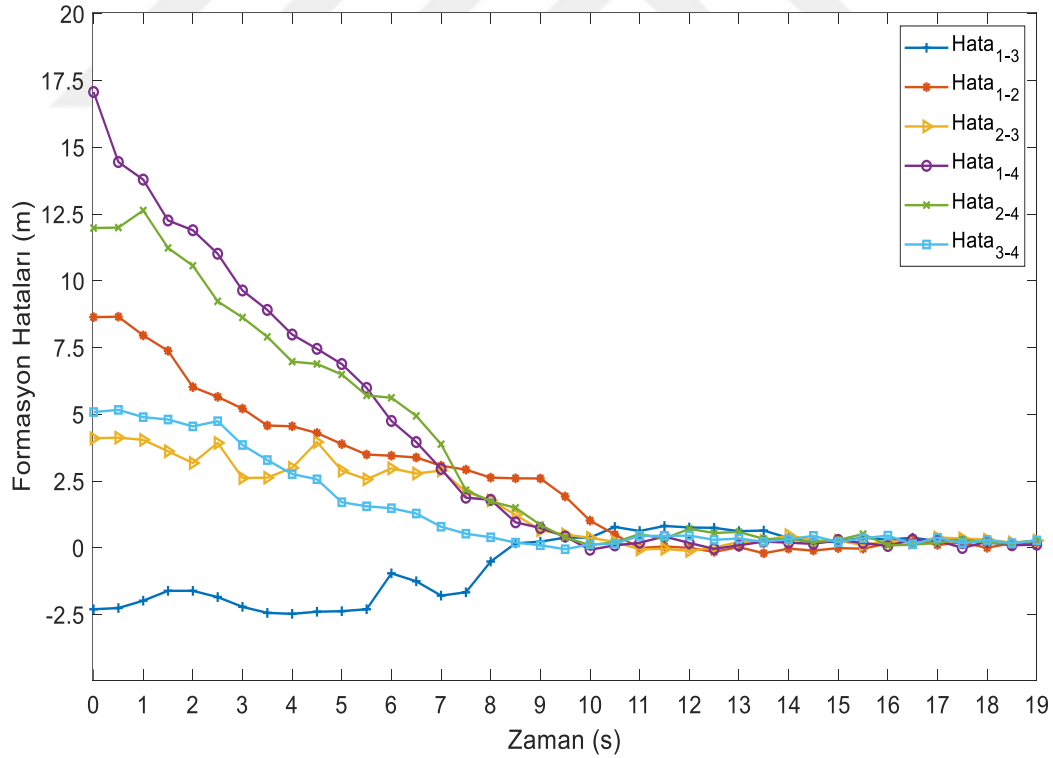
Şekil 49'da mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 17 metre civarında olduğu görülmüş ve 8.5'inci saniyeye kadar hata değeri kararlı ve neredeyse lineer bir şekilde azalarak yaklaşık 3 metreye inmiştir. Daha sonra, 9. saniyeden itibaren mesafe hatası azalmaya devam etmiş ve arzu edilen sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 49'da yeşil renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Kare formasyonuna başlarken ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 12 metre civarında olduğu ve 1 ile 2. saniyeler arasında bu değerin yaklaşık 13 metreye çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, mesafe hatasının sürekli ve düzgün azalımı ile hata değerinin 8. saniyede yaklaşık 3 metre civarına gerilediği görülmüştür. Son olarak, 8. saniyeden itibaren ilgili İHA'ların kare formasyonunu oluşturmak için ait oldukları konumlarına gitmeleri nedeni ile aralarındaki mesafe hatasının da sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 49'da turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının formasyona başlangıç anında 5 metre olduğu ve yaklaşık 2.5'inci saniyeye kadar bu hata değerini korudukları gözlemlenmiştir. Ardından, yaklaşık 3. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arasında meydana gelen mesafe hatası azalışını sürdürmüş ve son olarak sıfır değerine yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 48. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe bilgileri



Şekil 49. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri

Şekil 50’de İHA’ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi verilmiştir. Şekilde verilen tüm parametreler denklem (35)’te sunulan adaptasyon kuralı ile elde edilmiştir. İlk olarak mavi renk ile verilen eğri $\dot{c}_1$ parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili adaptasyon parametresindeki değişim incelendiğinde; İHA₁ ile İHA₂ arasındaki hatanın başlangıç anında büyük olması nedeni ile $\dot{c}_1$ parametresi ilk anda yaklaşık olarak 35 değerini almıştır. Daha sonra Şekil 49’da ilgili İHA’lar arasındaki mesafe hatası incelendiğinde, hata değerinin zamanla yavaş bir şekilde azalarak sıfıra yakınsadığı görülmektedir. Bu sebeple, mesafe hatasındaki bu yavaş azalış ile beraber $\dot{c}_1$ parametresinde meydana gelen değişimin başlangıç değerinden itibaren yavaşça azalarak sıfır değerine geldiği; böylece formasyon sağlandığı anda hata değerinin sıfıra yakınsaması nedeni ile adaptasyon parametresindeki değişimin de sabit kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekilde turuncu renk ile verilen eğri $\dot{c}_2$ parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 49’dan da görüleceği üzere ilgili İHA’lar arasındaki hatanın formasyon başlangıç anında yüksek olması nedeni ile $\dot{c}_2$ parametresi yaklaşık 62 değerini almıştır. Daha sonra mesafe hatasındaki değişimin sürekli azalması nedeni ile ilgili adaptasyon parametresi de zamanla değişimi azalarak yaklaşık 8. saniyeden itibaren sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Bu sayede $\dot{c}_2$ parametresindeki değişimin durması; ilgili İHA’ların kare formasyonunu sağladıklarını göstermektedir.

Şekilde sarı renk ile verilen eğri $\dot{c}_3$ parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. $\dot{c}_3$ parametresi başlangıç anında yaklaşık olarak 48 değerinde olduğu görülmekte ve ilgili parametredeki değişimin yaklaşık 2.5’inci saniyeye kadar azaldığı ve yaklaşık 40 değerine geldiği görülmektedir. Ancak Şekil 49’da ilgili İHA’lar arasındaki mesafe hatası incelendiğinde, 2.5 ile 3. saniyeler arasında mesafe hatasında hafif bir artış meydana gelmesi nedeniyle, $\dot{c}_3$ parametresinin de bu aralıktaki değişiminin tekrar artış yönünde olduğu görülmekte ve yaklaşık 42 değerine geldiği gözlemlenmektedir. Sonrasında, mesafe hatasındaki azalışla birlikte $\dot{c}_3$ parametresindeki değişim de azalarak yaklaşık 7.5’inci saniyeden itibaren sıfır değerine yakınsadığı ve böylece ilgili İHA’ların kare formasyonu için arzu edilen mesafeyi sağladıkları anlaşılmaktadır.

Şekilde mor renk ile verilen eğri $\dot{c}_4$ parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili parametrenin başlangıç anındaki değeri yaklaşık 31.2 olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 49’da ilgili İHA’lar arasındaki formasyon hatası incelendiğinde yaklaşık 2. saniyeye kadar hatadaki değişimin çok az olması nedeni ile $\dot{c}_4$ parametresindeki değişim de azalarak 2. saniyede yaklaşık 20 değerine gerilemiştir.

Ardından, 2. saniyeden yaklaşık 7. saniyeye kadar mesafe hatasındaki değişimin dalgalı olması nedeni ile ilgili adaptasyon parametresi de meydana gelen bu hataları kompanze etmek için 20 ile 30 arasında bir değişim göstermiştir. Son olarak 7. saniyeden sonra, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatası azalışını sürdürmesi ve sıfıra yakınsaması nedeni ile $\hat{c}_4$ parametresindeki değişim de azalarak sıfıra yakınsamıştır.

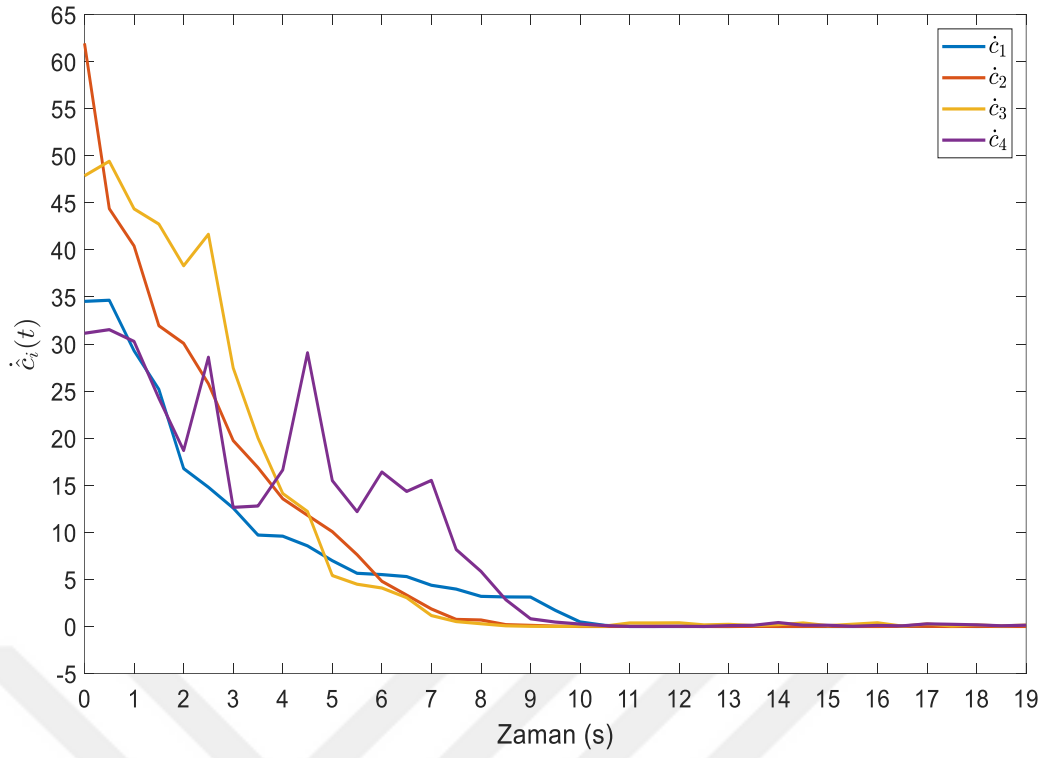
Şekil 51'de İHA'ların saha testlerinde kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin adaptasyon kuralına bağlı olarak başlangıç değerlerinden itibaren meydana gelen değişimleri sunulmuştur. Şekildeki her bir adaptasyon parametresinin başlangıç değeri $c_i(0) = 5$, ($i = 1, \dots, 4$) olarak alınmıştır. İlk olarak mavi renk ile verilen olan c_1 parametresi; İHA₁ – İHA₂ arasındaki hataya bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili adaptasyon parametresi, başlangıç değeri olan 5 değerinden itibaren yaklaşık 9. saniyeye kadar 16 değerine kadar arttığı gözlenmiştir. Şekil 49'da verilen kare formasyon oluşumunda ilgili İHA'lar arasında meydana gelen hata değeri incelendiğinde mesafe hatasının özellikle 9 ile 10. saniyeler arasında sıfır değerine yakınsadığı böylece, c_1 adaptasyon parametresi de ilgili saniyeler arasında son olarak yaklaşık 16.5 değeri etrafında sabit kaldığı gözlenmiştir.

Şekilde turuncu renk ile verilen c_2 parametresi; İHA₂ – İHA₃ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 49'dan da görüleceği üzere İHA₂ – İHA₃ arasındaki mesafe hatasının 7. saniye kadar oldukça yüksek değerden başlayıp azalış gösterdiği ve bu sebeple, c_2 parametresi başlangıç değeri olan 5'ten itibaren yaklaşık 7. saniyeye kadar artarak mesafe hatasını kompanze etmek için 20 değerine yaklaştığı görülmüştür. Ardından, İHA₂ – İHA₃ arasındaki mesafe hatasının 7. saniyeden sonra oldukça az değişim göstermesi nedeni ile ilgili adaptasyon parametresinin 19.8 değeri etrafında sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

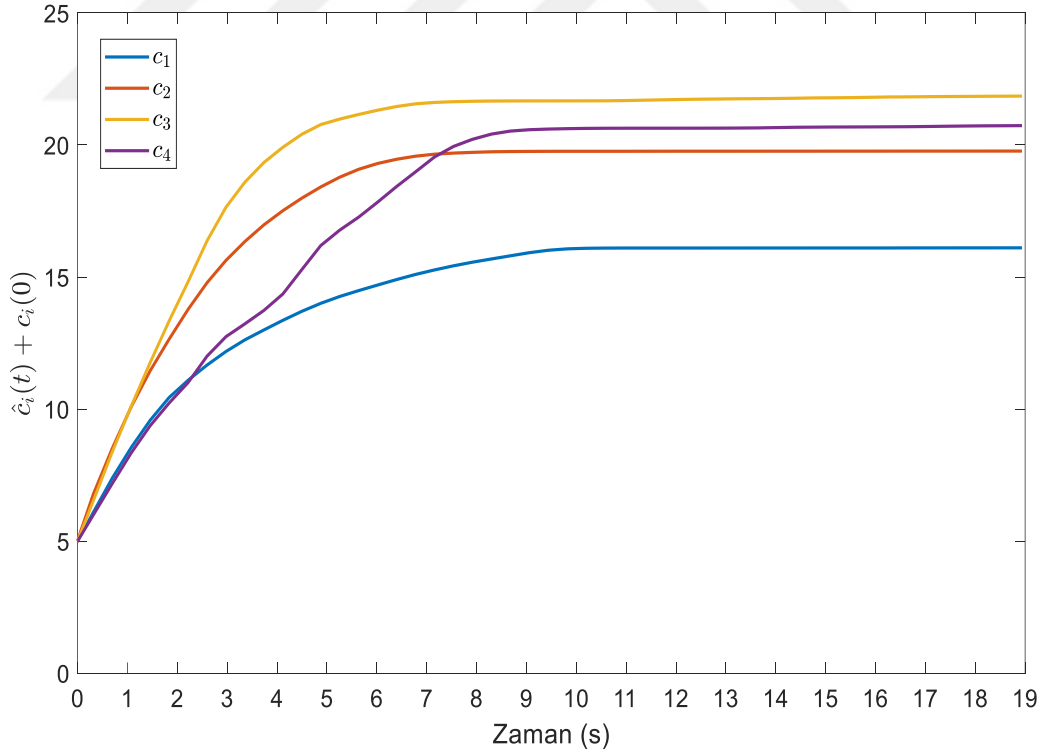
Şekilde sarı renk ile verilen c_3 parametresi İHA₃ – İHA₄ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 49'da sunulan İHA'lar arasındaki mesafe hatası incelendiğinde; İHA₃ – İHA₄ arasındaki hata değerinin 0 ile 5 metre aralığında olduğu görülmektedir. Ancak hatadaki değişimin az olmasına karşın c_3 parametresi, önce başlangıç değeri olan 5'ten itibaren 6. saniyeye kadar yaklaşık 21 değerine ulaştığı; ardından 7. saniyeden itibaren 22 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Son adaptasyon parametresi olan ve şekilde mor renk ile verilen c_4 parametresi ise $\dot{I}HA_4 - \dot{I}HA_1$ arasında oluşan hataya bağılı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. İlgili adaptasyon parametresi başlangıç değeri olan 5'ten itibaren 2.5'inci saniyede yaklaşık 11 değerine ulaşmıştır. Sonrasında, Şekil 49'dan da anlaşılacağı üzere ilgili $\dot{I}HA$ 'lar arasındaki hata değerinin yaklaşık 2. saniyeye kadar lineer bir değişim içerdiği ancak, 2.5 ile 8. saniyeler arasında dalgalı bir değişim göstermesi nedeni ile, c_4 parametresi de belirtilen saniyeler arasında oluşan mesafe hatasını kompanze etmek için dalgalı değerler almış ve 8. saniyede yaklaşık 21 değerine ulaştığı görülmüştür. Son olarak, mesafe hatasının 8. saniyeden itibaren az değişim göstermesi ve genliğinde belirgin bir artış göstermemesi nedeni ile c_4 parametresi 21 değeri etrafında sabit kaldığı görülmüştür.





Şekil 50. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi



Şekil 51. İHA'ların gerçek zamanlı kare formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri



Şekil 52. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen dik üçgen formasyon uçuş görüntüsü

Şekil 52'de İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen dik üçgen formasyon uçuşuna ait hava görüntüsü sunulmuştur. Açık alanda yapılan formasyon testi sırasında havanın rüzgarlı olmasına rağmen İHA'ların dik üçgen formasyonunu başarıyla gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 53'te İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe değişim bilgileri sunulmuştur. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Başlangıç anında ilgili İHA'lar arası mesafenin yaklaşık olarak 9.8 metre olduğu devamında, bu mesafenin azalarak 2. saniyede yaklaşık 6 metreye kadar azaldığı ardından, 2.5'inci saniyeden itibaren İHA'lar arasındaki mesafenin açılarak 6. saniyede yaklaşık 9.7 metreye çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra 6 ile 7. saniyeler arasında İHA'lar arasındaki mesafenin tekrar azalarak 8.4 metreye gerilediği ardından, 7. saniyeden itibaren mesafe değerinin artarak yaklaşık 10.3 değerinde son bulduğu görülmüştür. İHA'ların formasyon uçuşu boyunca mesafelerindeki artış ve azalışlar (birbirlerine yakınsama ve uzaklaşma şeklinde) önerilen AGKTFK'ne ek olarak toplam kontrol sinyaline eklenen çarpışmadan kaçınma algoritmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 53'te turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe başlangıç anında yaklaşık olarak 8 metre civarında olduğu ve bu mesafe değerinin yaklaşık 5. saniyeye kadar korunduğu görülmüştür. 5. saniyeden itibaren İHA'lar arasındaki mesafe azalarak yaklaşık 5.2 metre civarında sonlanmıştır. Böylece, İHA'ların formasyon oluşumu için belirlenen konumlarına geldikleri anlaşılmaktadır.

Şekil 53'te sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin başlangıç anında yaklaşık 8 metre civarında olduğu ancak, 0 ile 1. saniye aralığında bu mesafenin azalarak 6.2 metreye kadar azaldığı görülmüştür. Ardından, 1 ve 2. saniye aralığında İHA'lar arası mesafenin tekrar arttığı ve yaklaşık 9 metreye ulaştığı devamında, 5. saniyeye kadar bu mesafenin korunduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, 5. saniyeden itibaren ilgili İHA'lar arası mesafe tekrar azalmış ve son adımda yaklaşık olarak 5.4 metrede son bularak İHA'ların bu mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri anlaşılmıştır.

Şekil 53'te mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA'lar arasındaki mesafenin yaklaşık olarak 8.4 metre olduğu ve devamında mesafenin zamanla artarak 9. saniyede yaklaşık 12 metreye ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından, formasyonu oluşturmak için İHA'lar arasındaki mesafe azalarak yaklaşık 11.45 metreye düştüğü gözlemlenmiş ve İHA'ların bu mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri anlaşılmıştır.

Şekil 53'te yeşil renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin başlangıç anında yaklaşık olarak 7.8 metre olduğu ve bu değer artarak 4. saniyede yaklaşık 9.3 metreye geldiği görülmüştür. Daha sonra, 4. saniyeden itibaren İHA'lar arası mesafe azalarak son adımda yaklaşık 5.45 metreye kadar azaldığı gözlemlenmiş ve İHA'ların bu mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri anlaşılmıştır.

Şekil 53'te turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında dik üçgen formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin formasyona başlarken yaklaşık 11.4 metre olduğu görülmektedir. Daha sonra, İHA'ların dik üçgen formasyonunu oluşturabilmeleri için aralarındaki mesafenin zamanla azalarak yaklaşık 7.3 metreye gerilediği gözlemlenmiş ve İHA'ların bu mesafe altında formasyonu gerçekleştirdikleri anlaşılmıştır.

Şekil 54'te İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri sunulmuştur. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Bu iki İHA arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 0.5 metre civarında olduğu ve bu hata değerinin yaklaşık 2. saniyeye kadar artarak yaklaşık 4 metreye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, 2 ile 5. saniyeler arasında ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının azalarak sıfıra yakınsadığı görülse de 6.5'inci saniyede tekrar 2 metrelik bir mesafe hatasının olduğu gözlemlenmiştir.

Son adımda ise, 6.5 ile 10. saniyeler arasında İHA'lar arasında meydana gelen mesafe hatasının hafif dalgalanma ile beraber yaklaşık olarak 0.25 metrede son bulduğu gözlemlenmiştir. Belirtilen mesafe hatasının tamamen sıfırlanamamasının sebebi büyük ölçüde GPS'ten kaynaklı ölçüm hatasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 54'te turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 3 metre olduğu ve bu mesafe hatasının yaklaşık 5. saniyeye kadar devam ettiği görülmektedir. Daha sonra, 5 ile 9. saniyeler arasında mesafe hatasının 1 metrenin altına kadar gerilediği ve devamında, hata değerinin yaklaşık 0.25 metrede son bulduğu gözlemlenmiştir.

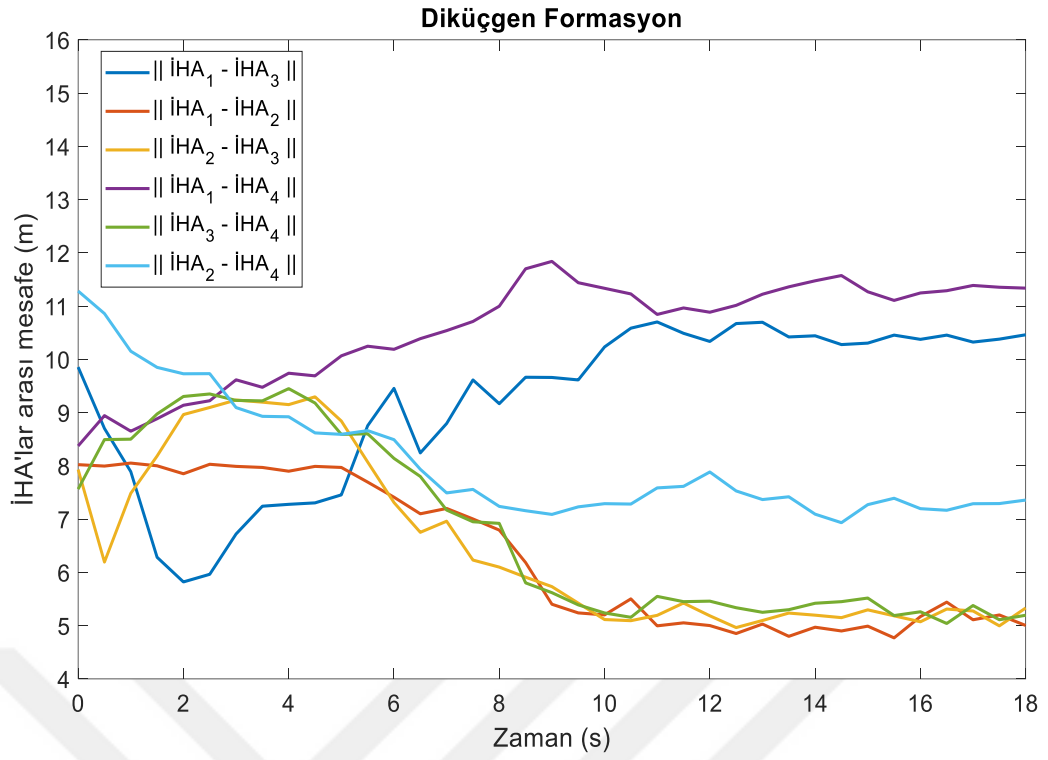
Şekil 54'te sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık olarak 3 metre olduğu, 0.5'inci saniyede yaklaşık 1.1 metreye kadar azaldığı ancak devamında mesafe hatasının 2. saniyede tekrar yaklaşık olarak 3.3 metreye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra, 2 ile 4.5'inci saniyeler arasında mesafe hatasının aynı değerini koruduğu ancak, önerilen AGKTFK sayesinde 5. saniyeden itibaren hatanın azalarak sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 54'te mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının başlangıç anında yaklaşık olarak 2.8 metre olduğu devamında, mesafe hatasının sürekli azalarak 7.5'inci saniye civarında yaklaşık olarak sıfıra yakınsadığı görülmüştür. Daha sonra, 8. saniyeden sonra mesafe hatası tekrar artış gösterse de, hata değeri 9. saniyeden itibaren tekrar azalarak sıfıra yakınsamış ve devamında, İHA'ların formasyonu yaklaşık 0.33 metrelik hata ile oluşturduğu görülmüştür.

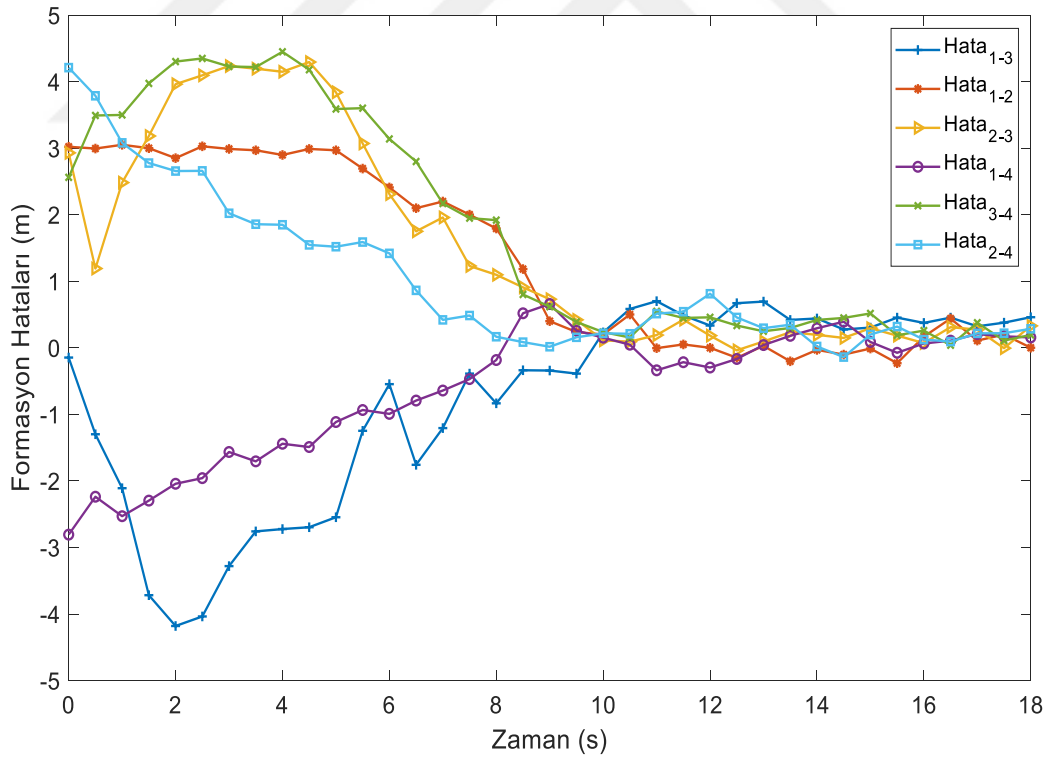
Şekil 54'te yeşil renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki başlangıç anında mesafe hatasının yaklaşık olarak 2.5 metre olduğu devamında, 2. saniyeye kadar mesafe hatasının artarak yaklaşık 4.2 metreye ulaştığı görülmüştür. Ardından, 2 ile 4. saniyeler arasında mesafe hatasının yaklaşık 4.2 metrede seyrettiği devamında, mesafe hatasının azalarak 8.5'inci saniyede 1 metrenin altına gerilediği gözlemlenmiştir. Son olarak, 8.5'inci saniyeden itibaren mesafe hatasının azalarak sıfıra yakınsadığı görülmüş ve İHA'ların formasyonu yaklaşık 0.27 metrelik hata ile oluşturdukları görülmüştür.

Şekil 54'te turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Dik üçgen formasyonuna başlamadan önce ilgili İHA'lar arası mesafenin yaklaşık olarak 4.2 metre olduğu görülmektedir. Daha sonra, formasyon uçuşu sırasında İHA'lar arasındaki mesafe hatasının sürekli düşüş gösterdiği ve yaklaşık 8.5'inci saniyeye kadar kararlı bir azalış sergilediği gözlemlenmiş ardından, 9. saniyeden itibaren mesafe hatasının hafif dalgalanmasına rağmen yaklaşık 0.25 metrelik bir hata ile formasyonun gerçekleştirildiği anlaşılmıştır.





Şekil 53. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri



Şekil 54. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri

Şekil 55'te İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen tüm parametreler denklem (35)'te sunulan adaptasyon kuralı ile elde edilmiştir. İlk olarak mavi renk ile verilen eğri $\dot{c}_1$ parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 54'ten ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatası incelendiğinde 2. saniyeye kadar mesafe hatasının genliğinde bir artış olsa da devamında küçük salınımlarla sifıra yakınsadığı görülmektedir. Bu sebeple, $\dot{c}_1$ parametresi başlangıç anında yaklaşık olarak 4.8 değerinde olduğu ve ardından, mesafe hatasına bağlı olarak küçük değişimlerle 6.5'inci saniyede yaklaşık olarak 3 değerine gerilediği görülmüştür. Daha sonra mesafe hatasının değerinin sifıra yakınsaması nedeni ile $\dot{c}_1$ parametresindeki değişim de sifıra yakınsamıştır.

Şekil 55'te turuncu renk ile verilen eğri $\dot{c}_2$ parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. $\dot{c}_2$ parametresinin formasyon başlangıç anında değerinin yaklaşık olarak 2 olduğu görülmektedir. Şekil 54'te İHA₂ ile İHA₃ arasındaki mesafe hatası incelendiğinde hata genliğinin önce azaldığı, sonrasında belirli bir seviyede artış gösterdiği ve son olarak da mesafe hatasının genliğinin azalarak 0.25 metrede sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu veriler ışığında $\dot{c}_2$ parametresi mesafe hatasındaki değişimlere bağlı olarak ilk başta 2 değerinden yaklaşık 0.11 değerine gerilediği, ardından meydana gelen mesafe hatalarını kompanze etmek için yaklaşık 4.15 değerine yükseldiği görülmüştür. Ardından, yaklaşık 5. saniyeden itibaren hatadaki değişimler ışığında $\dot{c}_2$ parametresindeki değişimin de azalarak sifıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 55'te sarı renk ile verilen eğri $\dot{c}_3$ parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. $\dot{c}_3$ parametresinin formasyon başlangıç anında değeri yaklaşık olarak 13.4 olduğu görülmektedir. Şekil 54'te verilen mesafe hata bilgileri incelendiğinde İHA₃ ile İHA₄ arasındaki hata değerinin ilk anda arttığı daha sonra mesafe hatasının azalarak sifıra yakınsadığı görülmektedir. Bu nedenle, $\dot{c}_3$ parametresinin mesafe hatasındaki artış nedeniyle meydana gelen hatayı kompanze etmek için 2.5'inci saniyede yaklaşık 35 değerine ulaştığı ve ardından, mesafe hatasının 2.5 ile 4.5'inci saniyeler arasında çok az değişim göstermesi nedeni ile $\dot{c}_3$ parametresi de bu sürede 33 ile 37.5 aralığında değişim göstermiştir. Sonrasında, İHA'lar arasındaki mesafe hatasının zamanla azalması nedeni ile $\dot{c}_3$ parametresi de 9. saniyeye kadar azalarak yaklaşık 37.5 değerinden 3 değerine gerilemiştir. Bu değişim sonucunda mesafe hatasının sifıra yakınsaması ne ile $\dot{c}_3$ parametresindeki değişim de azalarak sifıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

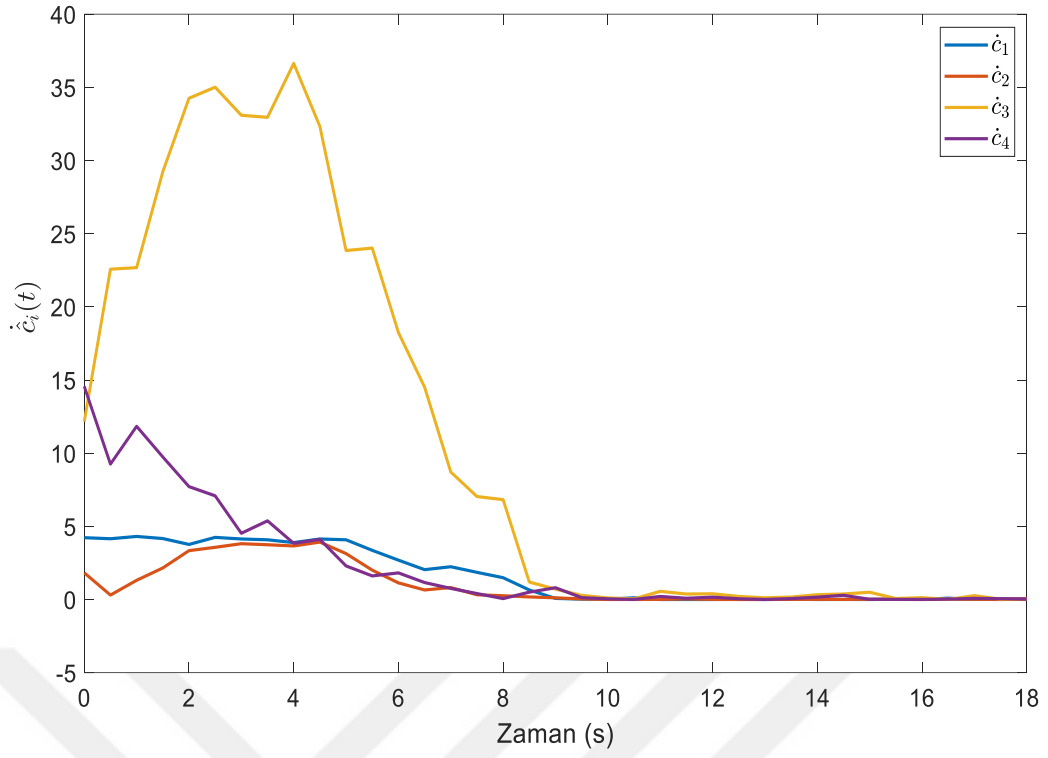
Şekil 55'te mor renk ile verilen eğri $\hat{c}_4$ parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. $\hat{c}_4$ parametresinin formasyon başlangıç anındaki değeri yaklaşık olarak 14.7 olduğu görülmektedir. Şekil 54'te sunulan İHA₄ ile İHA₁ arasındaki formasyon hatası incelendiğinde, mesafe hatasının başlangıç anından itibaren azalarak sıfır değerine yakınsadığı görülmektedir. Bu nedenle, $\hat{c}_4$ parametresi başlangıç anında mevcut olan yüksek hatayı kompanze etmek için 14.7 değerini aldığı, mesafe hatasının zamanla azalması nedeni ile $\hat{c}_4$ parametresindeki değişimin de azalarak sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 56'da İHA'ların saha testlerinde dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin adaptasyon kuralına bağlı olarak başlangıç değerlerinden itibaren meydana gelen değişimleri sunulmuştur. Şekildeki her bir adaptasyon parametresinin başlangıç değeri $c_i(0) = 5$, ($i = 1, \dots, 4$) olarak alınmıştır. İlk olarak mavi renk ile verilen c_1 parametresi; İHA₁ – İHA₂ arasındaki hataya bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 54'te ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatası incelendiğinde, ilk 2 saniye boyunca hata genliğinin arttığı ve ardından, 6. saniyede sıfıra yakınsadığı ve devamında salınım yaparak yaklaşık 0.3 metrelik bir hata ile İHA'ların formasyonu tamamlandığı görülmektedir. Bu nedenle, ilgili adaptasyon parametresi, başlangıç değeri olan 5 değerinden itibaren yaklaşık 7. saniyeye kadar 8 değerine kadar arttığı ve böylece mesafe hatasının azaltılmasını sağladığı gözlenmiştir. Ardından, hata değerinde hafif dalgalanmalar olsa da c_1 parametresinin bu değer etrafında sabit kaldığı gözlenmiştir. Meydana gelen mesafe hatasının tam olarak elimine edilememesinin sebebi GPS'ten kaynaklanan hatalı ölçümdür.

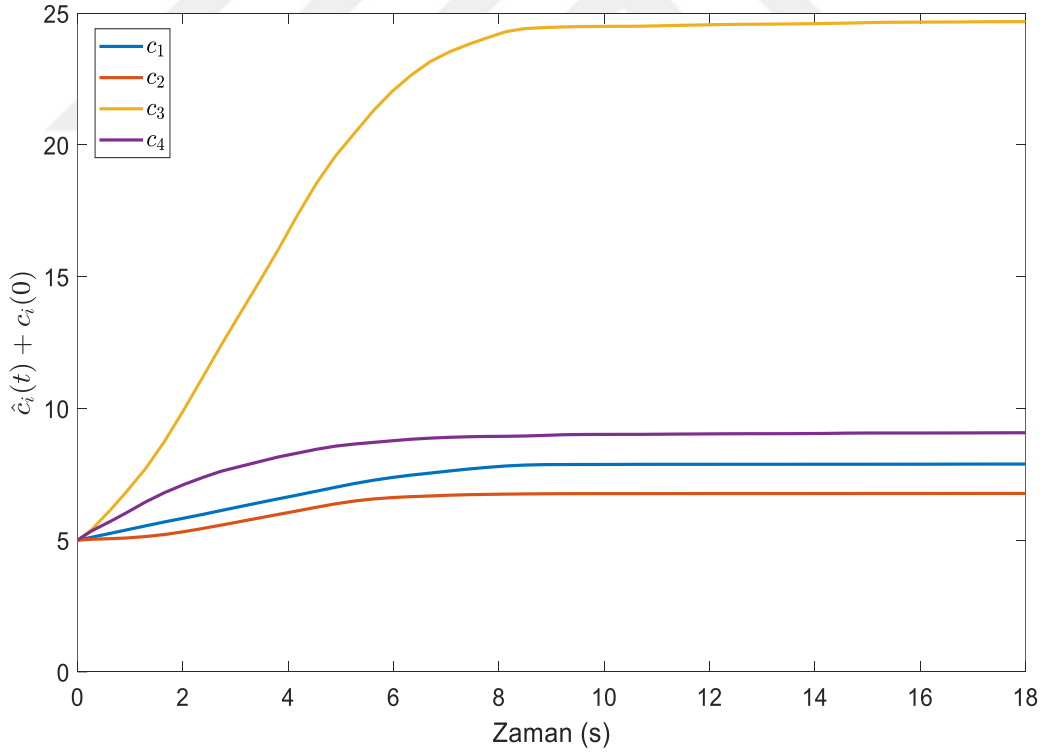
Şekil 56'da turuncu renk ile verilen c_2 parametresi; İHA₂ – İHA₃ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 54'ten de görüleceği üzere İHA₂ – İHA₃ arasındaki mesafe hatasının 0.5'inci saniyeye kadar azaldığı ve ardından, 2.5'inci saniyeye kadar hata genliğinin arttığı ve 2.5 ile 5. saniyeler arasında mesafe hatasının sabit kaldığı, 5. saniyeden itibaren ise hata genliğinin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, c_2 parametresinin başlangıç değeri olan 5'ten itibaren 5. saniyeye kadar artarak yaklaşık 7 değerine yükseldiği gözlemlenmiş ve devamında bu değerde sabit kaldığı görülmüştür. Böylece, ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının azaldığı ve elde edilen adaptasyon parametresinin oluşan hatayı kompanze edebildiği Şekil 53'ten de görülmektedir.

Şekil 56'da sarı renk ile verilen c_3 parametresi İHA₃ – İHA₄ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 54'te sunulan İHA'lar arasındaki mesafe hataları incelendiğinde; İHA₃ – İHA₄ arasındaki hata değerinin başlangıç anında arttığı, bir süre sabit kaldığı ve devamında azaldığı görülmektedir. Bu nedenle c_3 parametresi, önce başlangıç değeri olan 5'ten itibaren mesafe hatasını kompanze edebilmek için 8. saniyeye kadar yaklaşık 24 değerine ulaştığı; ardından 8. saniyeden itibaren 24.2 değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

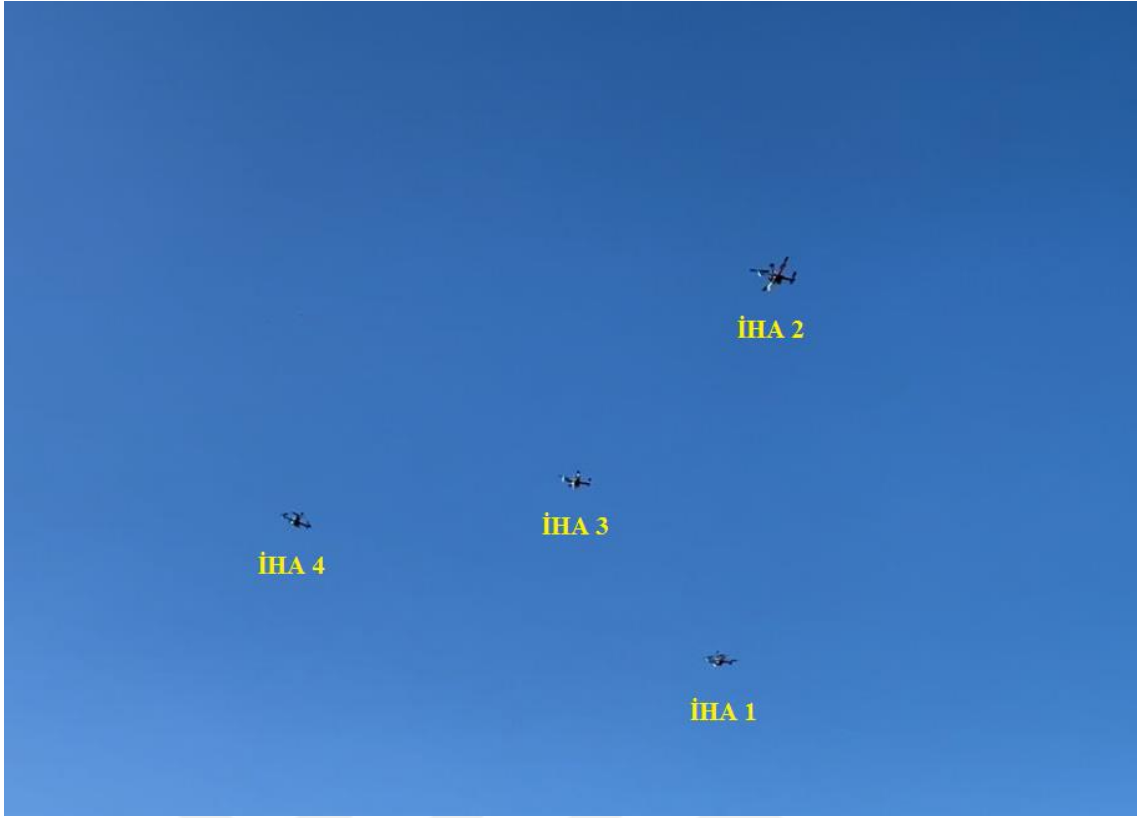
Son olarak Şekil 56'da mor renk ile verilen c_4 parametresi İHA₄ – İHA₁ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. İlgili adaptasyon parametresi ilk anda 5 değerinden başlayarak artış göstermiş ve 8. saniyede 9 değerine yükselerek formasyon bitimine kadar bu değerinde sabit kalmıştır. Şekil 54'ten görüldüğü üzere mesafe hatasının başlangıç anında yüksek olduğu ve devamında ise, hata değerinin azalarak yaklaşık 0.2 metre civarında sabit kaldığı görülmüştür. Ayrıca, c_4 parametresinin mesafe hatasının genliğini formasyon başlangıç anından itibaren başarılı bir şekilde azalttığı ve İHA'ların ölçümden kaynaklı hatalarına rağmen arzu edilen formasyon kontrolünü başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür.



Şekil 55. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi



Şekil 56. İHA'ların gerçek zamanlı dik üçgen formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri



Şekil 57. İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen bumerang formasyonuna ait uçuş görüntüsü

Şekil 57'de İHA'ların gerçek zamanlı saha testlerinde elde edilen bumerang formasyonuna ait uçuş görüntüsü sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere İHA'ların bumerang formasyonunu başarıyla oluşturdıkları görülmektedir.

Şekil 58'de İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe bilgileri sunulmuştur. Şekilde koyu mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlk anda bu iki İHA arasındaki mesafenin yaklaşık 10.3 metre civarında olduğu ve formasyon uçuşu boyunca bu mesafenin azalarak yaklaşık 9. saniyeden itibaren arzu edilen değer olan 5 metreye indiği görülmüştür. Sonrasında ise, İHA'ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.4 metre hata ile gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Şekil 58'de turuncu renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₂ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafenin ilk anda yaklaşık olarak 5 metre olduğu ve ardından, formasyon uçuşu boyunca bu mesafenin yaklaşık 10.2 metreye kadar arttığı gözlemlenmiştir. Böylece, İHA'ların arzu edilen formasyon konumlarına gelerek formasyonu tamamladıkları görülmektedir.

Şekil 58’de sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlk anda ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık olarak 5 metre olduğu gözlemlenmiştir. Sonrasında, formasyon uçuşu sırasında ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin 9. saniyede yaklaşık 7.6 değerine kadar arttığı ve bu mesafeyi yaklaşık 17. saniyeye kadar korudukları görülmüştür ardından, İHA’ların arzu edilen formasyonu yaklaşık 0.2 metre hata ile tamamladıkları gözlemlenmiştir.

Şekil 58’de mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlgili İHA’lar arasındaki mesafenin başlangıç anında yaklaşık olarak 7.7 metre civarında olduğu, 1. saniyede bu değerin yaklaşık olarak 6.6 metreye gerilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, 1.5 ‘inci saniyeden 9. saniyeye kadar ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin 10.3 metreye kadar arttığı ve devamında ise 10.35 metre noktasında sonlandığı görülmüştür. Bu noktada İHA’ların formasyon konumlarına geldikleri anlaşılmaktadır.

Şekil 58’de yeşil renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. Formasyon başlangıç anında ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin yaklaşık olarak 6 metre civarında olduğu ve yaklaşık 3. saniyede 9 metreye kadar çıktığı görülmüştür. Ardından, 4.5’inci saniyede ilgili İHA’lar arası mesafenin 8 metreye indiği ve 7. saniyeye kadar İHA’ların bu mesafeyi korudukları gözlemlenmiştir. Sonrasında, 7. saniyeden itibaren ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin azalarak yaklaşık 7.25 metreye kadar indiği ve devamında ise, İHA’ların bu mesafe altında formasyonu gerçekleştikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 58’de turkuaz rengi ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe değişimlerini göstermektedir. İlk anda ilgili İHA’lar arasındaki mesafenin 10.7 metre civarında olduğu ve yaklaşık 8.5’inci saniyeye kadar artarak yaklaşık 14.8 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Son aşamada ise formasyonu gerçekleştirmek adına İHA’lar arası mesafenin yaklaşık 13.97 metre olduğu görülmüş ve İHA’ların bu mesafede formasyonu gerçekleştirdikleri anlaşılmıştır.

Şekil 59’da İHA’ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında meydana gelen mesafe hataları sunulmuştur. Şekilde mavi renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₃ arasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. Bu iki İHA arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık olarak 5 metre civarında olduğu, daha sonra bu hata değerinin zamanla sıfır değerine yaklaştığı ve bumerang formasyonu için arzu edilen mesafenin sağlandığı görülmüştür.

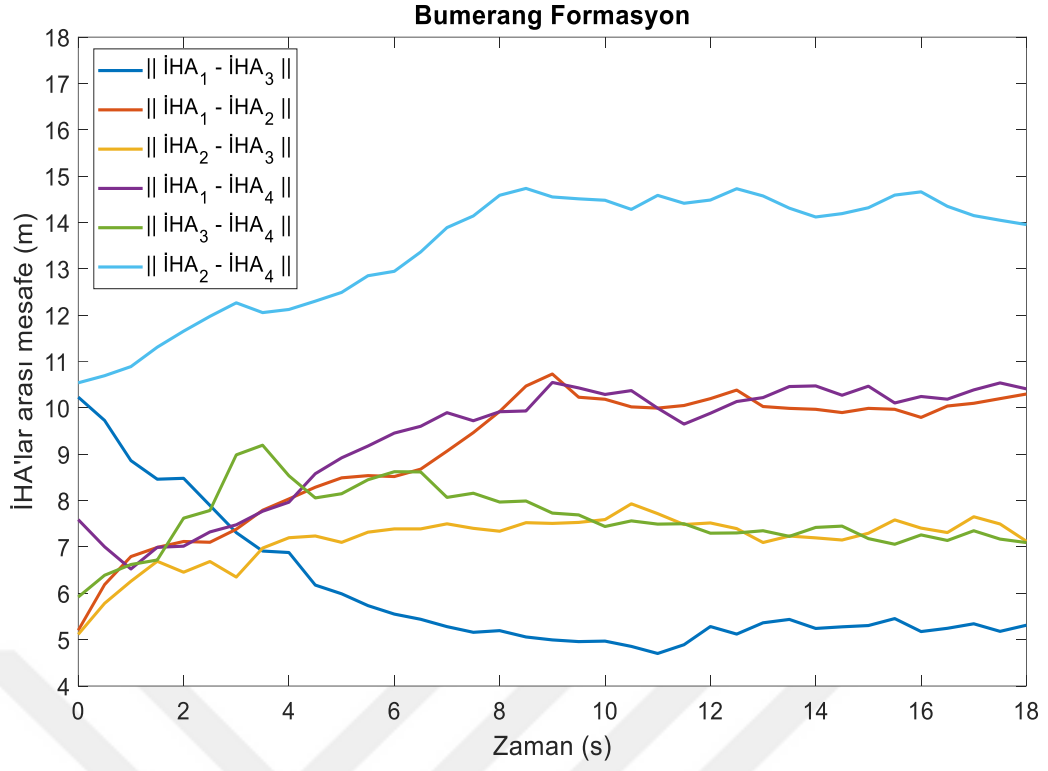
Şekil 59'da turuncu renk ile verilen eğri ise İHA₁ ile İHA₂ arasındaki bumerang formasyonu sırasında oluşan mesafe hata bilgisidir. İlgili İHA'lar arasında ilk anda yaklaşık 5 metrelik bir mesafe hatası olduğu görülmektedir. Devamında, özellikle 7. saniyeden sonra ilgili İHA'lar arası mesafe hatasının azalarak sıfıra yakınsadığı ve araçların bumerang formasyonu için arzu edilen mesafeye geldikleri gözlemlenmiştir.

Şekil 59'da sarı renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₃ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasında başlangıç anında yaklaşık 2 metrelik bir mesafe hatasının olduğu görülmektedir. Hata değerinin düşük olması nedeni ile ilgili İHA'lar arasındaki mesafe hatası yaklaşık 3.5 saniyeden sonra sıfır değeri etrafında küçük sapmalar ile devam etmiş ardından sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

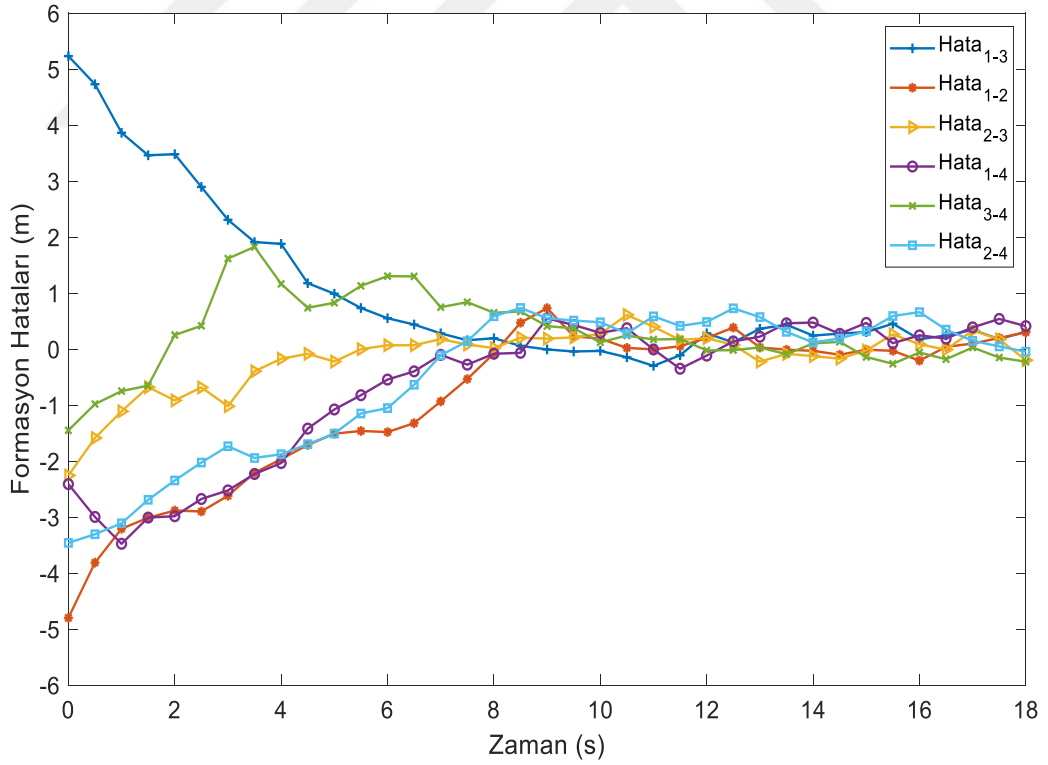
Şekil 59'da mor renk ile verilen eğri İHA₁ ile İHA₄ arasında bumerang formasyonu sırasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlk anda ilgili İHA'lar arası mesafe hatasının genlik değerinin yaklaşık olarak 2.2 metre civarında olduğu ve devamında 1. saniyeye kadar hata değerinin 4 metreye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonra mesafe hatasının zamanla azaldığı ve sıfır değerine oldukça yakınsadığı görülmüştür.

Şekil 59'da yeşil renk ile verilen eğri İHA₃ ile İHA₄ arasında bumerang formasyon uçuşu sırasında meydana gelen mesafe hatasını göstermektedir. İlgili İHA'lar arasındaki mesafe hatasının ilk anda yaklaşık 1.7 metre olduğu ve ardından yaklaşık 3 ile 4. saniyeler arasında 2 metreye yaklaştığı ve devamında ise hata değerindeki azalmaya bağlı olarak sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Bu sayede ilgili İHA'ların bumerang formasyonu için arzu edilen konumlarına geldikleri anlaşılmaktadır.

Son olarak Şekil 59'da turkuaz renk ile verilen eğri İHA₂ ile İHA₄ arasındaki mesafe hatasını temsil etmektedir. İlgili İHA'lar arası hata mesafesinin ilk anda yaklaşık 3.8 metre civarında olduğu, ancak devamında ilgili İHA'ların bumerang formasyonunu oluşturmak için arzu edilen noktalara ulaşmalarıyla birlikte hata değerinin de 20-30 cm'e kadar azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 58. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe bilgileri



Şekil 59. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında aralarında oluşan mesafe hata bilgileri

Şekil 60'da İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi sunulmuştur. Şekilde verilen tüm parametreler denklem (35)'te sunulan adaptasyon kuralı ile elde edilmiştir. İlk olarak mavi renk ile verilen eğri $\dot{c}_1$ parametresine ait olup İHA₁ ile İHA₂ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili adaptasyon parametresindeki değişim incelendiğinde; İHA₁ ile İHA₂ arasındaki hatanın başlangıç anında büyük olması nedeni ile $\dot{c}_1$ parametresinin de ilk anda yaklaşık olarak 24 değerini aldığı ve ardından, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının zamanla azalması ve sıfıra yakın değer etrafında sabit kalması nedeniyle adaptasyon parametrelerindeki değişimin de sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 60'da turuncu renk ile verilen eğri $\dot{c}_2$ parametresine ait olup İHA₂ ile İHA₃ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 59'dan da görüleceği üzere ilgili İHA'lar arasındaki hatanın zamanla değişiminin az olması nedeni ile $\dot{c}_2$ parametresindeki değişimin de oldukça az olduğu görülmektedir. İlk anda yaklaşık 4.7 değerinden başlayan $\dot{c}_2$ parametresindeki değişim miktarı, daha sonra ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasındaki azalmayla birlikte sıfıra yakınsamış ve yaklaşık 4. saniyeden itibaren neredeyse değişim göstermemiştir.

Şekil 60'da sarı renk ile verilen eğri $\dot{c}_3$ parametresine ait olup İHA₃ ile İHA₄ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili adaptasyon parametresi incelendiğinde, başlangıç anında yaklaşık 4.6 değerini aldığı, formasyon hatasındaki değişime bağlı olarak sıfıra yakınsadığı ancak, 2 ile 3. saniyeler arasında formasyon hatasındaki değişim ile birlikte yaklaşık 3.8 ile 4. saniyeler arasında 5.4 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından Şekil 59 incelendiğinde, ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatasının 4 ile 9. saniyeler arasında zamanla değişim göstermesi nedeni ile $\dot{c}_3$ parametresinin de meydana gelen formasyon hatalarını kompanze etmek için 0 ile 5 değeri arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

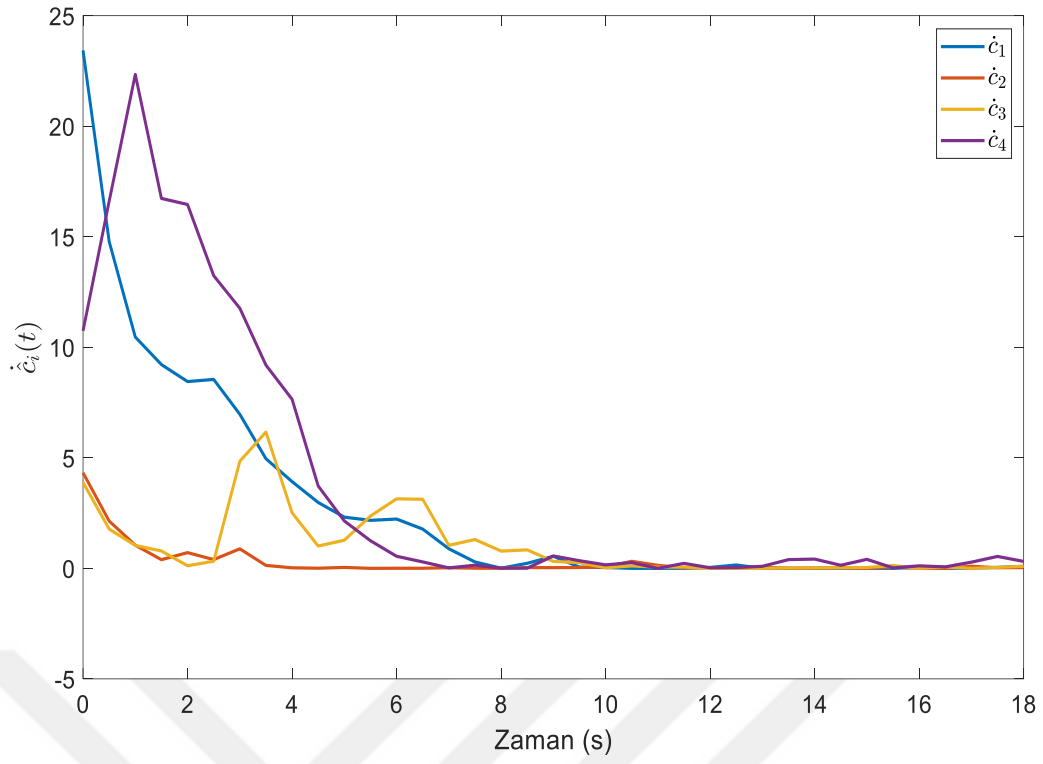
Şekil 60'da mor renk ile verilen eğri $\dot{c}_4$ parametresine ait olup İHA₄ ile İHA₁ arasındaki formasyon hatasına bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 59'da ilgili İHA'lar arasındaki formasyon hatası incelendiğinde yaklaşık 7. saniyeye kadar lineer devam eden bir formasyon hatasına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, $\dot{c}_4$ parametresi de meydana gelen formasyon hatalarını kompanze etmek için 1. saniyeye kadar yaklaşık olarak 10.5'ten 24'e kadar bir değişim göstermiş, ardından 1 ile 7. saniyeye kadar formasyon hata değerinin azalması nedeni ile kontrolcü parametresindeki değişim de azalma göstermiştir. Son olarak 7 ile 10. saniyeler arasında formasyon hatasının yaklaşık olarak sıfır olması nedeni ile $\dot{c}_4$ parametresindeki değişimin de yaklaşık sıfır değerine yakınsadığı görülmüştür.

Şekil 61’de İHA’ların saha testlerinde bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin adaptasyon kuralına bağlı olarak başlangıç değerlerinden itibaren meydana gelen değişimleri sunulmuştur. Şekildeki her bir adaptasyon parametresinin başlangıç değeri $c_i(0) = 5$, ($i = 1, \dots, 4$) olarak alınmıştır. İlk olarak, mavi renk ile verilen c_1 parametresi; İHA₁ – İHA₂ arasındaki hataya bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili adaptasyon parametresinin, başlangıç değeri olan 5 değerinden itibaren yaklaşık 6. saniyeye kadar 9.5 değerine kadar arttığı gözlemlenmiştir. Böylece, Şekil 59’da verilen bumerang formasyon oluşumunda ilgili İHA’lar arasında meydana gelen hataya bağlı olarak c_1 adaptasyon parametresindeki değişimin 6. saniyeden itibaren azaldığı ve son olarak 9.5 değeri etrafında sabit kaldığı görülmüştür.

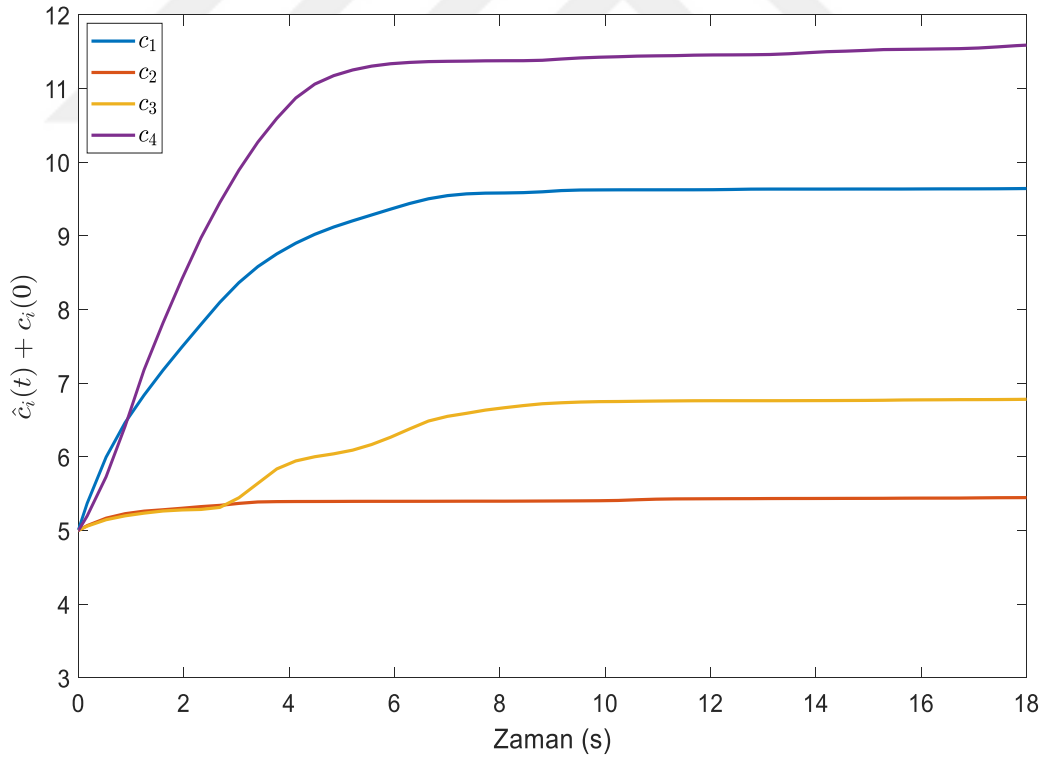
Şekil 61’de turuncu renk ile verilen c_2 parametresi; İHA₂ – İHA₃ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 59’dan da görüleceği üzere İHA₂ – İHA₃ arasındaki mesafe hatasının başlangıç anından itibaren çok büyük olmaması nedeniyle, ilgili adaptasyon parametresindeki değişimin çok fazla olmadığı gözlemlenmiş ve yaklaşık olarak başlangıç değeri olan 5’ten sonra 5.5 değeri etrafında sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 61’de sarı renk ile verilen c_3 parametresi İHA₃ – İHA₄ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 59’da sunulan İHA’lar arasındaki formasyon hataları incelendiğinde; İHA₃ – İHA₄ arasındaki hata değerinin ± 2 metre aralığında olduğu görülmektedir. Hatadaki değişimin az olması nedeniyle c_3 parametresinin önce başlangıç değeri olan 5’ten itibaren 3. saniyeye kadar çok az değişim gösterdiği; ardından 3 ila 7. saniyeler arasında yaklaşık olarak 6.5 değerine kadar artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Son olarak ilgili parametre değerinin 8. saniyeden itibaren 6.5 değerinde sabit kaldığı görülmüştür.

Son olarak Şekil 61’de mor renk ile verilen c_4 parametresi ise İHA₄ – İHA₁ arasında oluşan hataya bağlı olarak elde edilen adaptasyon parametresini temsil etmektedir. Şekil 59’dan da anlaşılabacağı üzere ilgili İHA’lar arasındaki hata değerinin yaklaşık 6. saniyeye kadar lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, ilgili adaptasyon parametresi hatadaki bu sürekli değişime karşılık oluşan hatayı kompanze etmek için 6. saniyeye kadar başlangıç değeri 5’ten itibaren sürekli artış göstermiştir. 6. saniyeden itibaren yaklaşık 11.5 değerine oluşan c_4 parametresinin hatadaki değişimin oldukça azalmasından dolayı bu değer etrafında sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 60. İHA'ların gerçek zamanlı bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin türevlerinin zamanla değişimi



Şekil 61. İHA'ların bumerang formasyon uçuşu sırasında adaptasyon parametrelerinin zamanla değişimleri

SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR

Bu tez çalışmasında, dört adet açık kaynak kodlu İHA'nın çeşitli formasyon şekillerini gerçekleştirebilmeleri için lineer hızları üzerinden sağladıkları fikir birliğine dayalı temel KTFK yöntemi referans alınarak, hem gürbüz hem de adaptif gürbüz formasyon kontrol yöntemleri önerilmiş ve gerçek zamanlı saha testleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, tasarımı gerçekleştirilen GKTFK yöntemi simülasyon ve gerçek zamanlı olarak dış ortamda üçgen, eşkenar dörtgen ve hat formasyon şekilleri için test edilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, ilk formasyon şekli olan üçgen formasyon için İHA'ların başlangıç konumlarından itibaren üçgen formasyonu sağlamaya çalıştıkları görülmektedir. Özellikle 30. saniyeden sonra İHA'ların üçgen formasyonunu sağladıkları ve x ve y yörüngelerindeki lineer hızlarının sıfır değerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. İkinci formasyon şekli olan eşkenar dörtgen formasyonunda ise, İHA'lar başlangıç konumlarından hareketle 15. saniyeye kadar dörtgen formunu yakalamaya çalıştıkları görülmüş ve devamında, yaklaşık 35. saniyeden itibaren benzer şekilde lineer hızları üzerinde fikir birliği sağladıkları gözlemlenmiştir. Son formasyon şekli olan hat formasyonunda ise, İHA'ların başlangıç konumlarından itibaren arzu edilen formasyonu sağlamak için x ve y yörüngeleri boyunca hareket ettikleri ve benzer şekilde yaklaşık 30. saniyede x ekseninde hat formasyonunu başarıyla oluşturdukları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak simülasyon sonuçları incelendiğinde, önerilen GKTFK yöntemi ile elde edilen K parametresi aracılığıyla İHA'ların arzu edilen formasyon düzenlerini başarıyla oluşturdukları ve lineer hızları (hem x hem de y ekseninde) üzerinde fikir birliği sağladıkları gözlemlenmiştir.

Ayrıca, GKTFK algoritması simülasyon çalışmalarında olduğu gibi üçgen, eşkenar dörtgen ve hat formasyonu için gerçek zamanlı olarak açık alanda da test edilmiştir. Üçgen formasyonu için gerçek zamanlı saha test sonuçları incelendiğinde, başlangıç konumlarından hareketle kendilerine verilen referans yüksekliğe çıktıktan sonra İHA'ların üçgen formasyon şeklini başarıyla gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Özellikle açık alanda yapılan testler sırasında rüzgardan kaynaklı bozucu etkiler altında İHA'ların kontrolü zorlaşsa da, önerilen kontrol yönteminin bozucu etkileri büyük oranda elimine ettiği ve İHA'lar arasında oluşan formasyon hatasının genel olarak GPS hassasiyetinden kaynaklandığı görülmüştür. İkinci formasyon şekli olan eşkenar dörtgen formasyon uçuşunda ise, İHA'ların yeni formasyon koordinatlarına geldikten sonra formasyonu gerçekleştirmek için aralarındaki mesafeyi arzu edilen referans değere indirgedikleri ve havada eşkenar formasyonu başarıyla oluşturdukları görülmüştür. Ancak, benzer şekilde GPS hassasiyetinden kaynaklı ölçüm hataları nedeniyle

formasyon hatasının sıfır olmadığı gözlemlenmiştir. Son formasyon şekli olan hat formasyonunda ise, tüm İHA'ların tek bir hat üzerinde dizilişlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen GKTFK algoritması ile, rüzgârdan kaynaklı bozucu etki altında İHA'ların hat düzenini küçük hatalar ile oluşturdukları gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamında ana formasyon kontrolcüsü olarak önerilen AGKTFK algoritması da kare, dik üçgen ve bumerang formasyon şekilleri için hem simülasyon hem de gerçek zamanlı olarak açık alanda test edilmiştir. İlk olarak, bumerang formasyon sonuçları incelendiğinde, İHA'ların başlangıç konumlarından itibaren hızla bumerang düzeni almaya çalıştıkları görülmüş ve yaklaşık 25. saniyede lineer hızları üzerinde sağladıkları fikir birliği ile arzu edilen formasyon şeklini başarıyla oluşturdukları gözlemlenmiştir. Ayrıca, formasyon uçuşu boyunca önerilen AGKTFK algoritmasıyla üretilen uygun katsayılar ile İHA'ların daha kısa sürede arzu edilen formasyonu gerçekleştirdikleri görülmüştür. İkinci formasyon şekli olan dik üçgen formasyonunda ise, İHA'ların birbirlerine olan konumları nedeni ile formasyon süresi uzamış olsa da, devamında dik üçgen formasyonunu başarıyla oluşturdukları gözlemlenmiştir. Son formasyon şekli olan kare formasyonunda ise, İHA'ların yaklaşık 20. saniyede formasyon düzenini sağladıkları gözlemlenmiştir. Başlangıç anında İHA'lar arası mesafenin uzak olmasına rağmen, önerilen AGKTFK algoritması ile kontrolcü parametrelerinin güncellendiği ve devamında İHA'ların kare formasyonunu kısa sürede başarıyla oluşturdukları görülmüştür.

Ayrıca, AGKTFK algoritması simülasyon çalışmalarında olduğu gibi kare, dik üçgen ve bumerang formasyon şekilleri için gerçek zamanlı olarak sahada da test edilmiştir. İlk formasyon şekli olan kare formasyon sonuçları incelendiğinde, İHA'ların referans yüksekliğe ulaştıktan sonra arzu edilen formasyon konumlarına geldikleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, formasyon hatasına bağlı olarak adaptasyon parametresi önerilen kontrolcü tarafından uyarlanmış ve yaklaşık 7 saniye içinde İHA'ların kare formasyonunu başarıyla oluşturdukları gözlemlenmiştir. İkinci formasyon şekli olan dik üçgen formasyon sonuçları incelendiğinde, İHA'ların yeni formasyon koordinatlarına ulaştıktan sonra aralarındaki mesafeyi hızla azaltarak dik üçgen formasyonunu oluşturdukları görülmüştür. Özellikle belirli İHA'lar arasındaki mesafe hatasına bağlı olarak uygun kontrolcü katsayılarının önerilen AGKTFK algoritması ile elde edildiği gözlemlenmiş ve İHA'ların dik üçgen formasyonunu başarıyla oluşturdukları görülmüştür. Son formasyon şekli olan bumerang formasyon sonuçları incelendiğinde ise, İHA'ların yeni formasyon koordinatlarına geldikten sonra arzu edilen bumerang formasyonunu başarıyla oluşturdukları görülmüştür. Ayrıca, test sırasında sahadaki rüzgardan kaynaklı bozucu etkiye rağmen, İHA'lar arasındaki formasyon hatasının zamanla

sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiş ve bu durum önerilen AGKTFK algoritmasının etkinliğini göstermiştir.

Tüm bu sonuçlar incelendiğinde, önerilen AGKTFK algoritması ile İHA'ların özellikle gerçek zamanlı saha testlerinde arzu edilen formasyonları başarıyla gerçekleştirdikleri, yoğun rüzgâra rağmen adaptif kontrolcünün sistemin ihtiyacı olan katsayıları yeniden hesaplayarak, İHA'ların arzu edilen formasyonu korumaları sağlanmıştır. Ayrıca İHA'ların, yeni atanan formasyon noktalarına giderek konum doğrulamasını da başarıyla gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir.

Öneriler;

1. Önerilen AGKTFK algoritmasının etkinliğini daha iyi gözlemlemek adına test çalışmaları daha iyi donanıma sahip İHA'lar ile gerçekleştirilebilir.
2. Konsensüs kontrol denkleminde sunulan konum ve hız eşitliklerinin sahip olduğu kazanç değerleri de adaptif hale getirilerek hem konum hem de hız üzerinden ayrı ayrı adaptasyon kuralı geliştirilebilir.
3. Formasyon uçuşu sırasında İHA'ların yeni koordinatlarına giderken kullanılan PD konum kontrolcüsü yerine doğrusal olmayan kontrol yöntemleri kullanılabilir.
4. Geliştirilen sürü İHA'lar ile; kampüs güvenliği, orman yangınlarının tespiti, haritalama, zirai ilaçlama, askeri uygulamalar ve benzeri alanlarda uygulamalar geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Abdessameud, A. and Tayebi, A., (2013). Motion Coordination for VTOL Unmanned Aerial Vehicles, *Advances in Industrial Control. Springer-Verlag London*, 182 pages.
- Ailon, A. and Arogeti, S., (2013). Formation Control Strategies for Autonomous Quadrotor Type Helicopters. *2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of UAV*, France, pp. 324-329.
- Amoozgar, M.H., Chamseddine, A. and Zhang, Y., (2012). Fault-Tolerant Fuzzy Gain-Scheduled PID for a Quadrotor Helicopter Testbed in the Presence of Actuator Faults. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 3, pp. 282-287.
- Anonymos, 2023. <https://www.raspberrypi.org/>
- Anonymous, 2023b. <https://pixhawk.org/>
- Anonymous, 2023c. <https://realpython.com/python-sockets/>
- Başçi, A., (2016). Quadrotor'un Yörünge Takibinin Kesir Dereceli PI Kontrolcü ile Gerçek Zamanlı Kontrolü, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6, pp. 49-56.
- Biever, E., (2015). Controlling of an single drone. *Msc Thesis*, Department of Mechanical, Engineering, Eindhoven University of Technology.
- Birds Ecology. (<http://birding-world.com/birds-fly-v-shaped-formation/>).
- Boyd, S., Ghaoui, L. E., Feron, E. ve Balakrishnan, V., (1994b). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. *Studies in Applied Mathematics*, SIAM.
- Can K. and Başçi, A., (2022). Swarm Control of a Group of Unmanned Aerial Vehicle under Fixed Consensus Topology. in *Proc. of Int. Symp. Aircraft Tech., MRO & Oper. (ISATECH'22)*, Belgrade, Serbia.
- Can K. and Başçi, A., (2022). Time-Varying Formation Control of a Group of Quadrotor System with Collision Avoidance. in *Proc. Int. Symp. on Unmanned Systems and the Defence Industry (ISUDEF'22)*, Madrid, Spain.
- Can, K and Basci, A., (2023). Robust Formation Control of A Group of UAV. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 29, no. 4, pp. 4-10.
- Can, K. and Başçi, A., (2016). Dört Rotorlu bir İHA'nın Geri Adımlamalı Kontrolcü ile Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrolü. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6, pp. 77-85.
- Can, K. and Başçi, A., (2021). Leader-Follower Formation Control of Quadrotors: A Simple Virtual Leader Approach. in *Proc. of Int. Symp. on Appl. Sci. Eng. (ISASE)*, Erzurum, Turkey, pp. 479-483.
- Can, K. and Başçi, A., (2022). Consensus-based Swarm Control of a Group of Unmanned Aerial Vehicles throughout Time-varying Trajectory, *Fırat Univ. Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 441- 446.
- Can, K., (2017). Dört Rotorlu Bir İnsansız Hava Aracının Kayan Kipli Kontrolcü ile Yörünge Takibinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Chamseddine, A., Zhang, Y. and Rabbath, C.A., (2012). Trajectory Planning and Re-planning for Fault Tolerant Formation Flight Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles. *2012 American Control Conference*, Canada, pp. 3291-3296.
- Chen, B.-S., Liu, Y.-C., Lee, M.-Y. and Hwang, C.-L., (2022). Decentralized H_∞ PID Team Formation Tracking Control of Large-Scale Quadrotor UAVs under External Disturbance and Vortex Coupling. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 108169-108184.
- Chen, J., Chen, P., Xu, Y., Qi, N., Fang, T., Dong, C. and Wu, Q., (2021). Consensus-Based Cooperative Formation Guidance Strategy for Multiparafoil Airdrop Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 2175-2184.
- Choi, J., Song, Y., Lim, S., Kwon, C. and Oh, H., (2020). Decentralized Multi Subgroup Formation Control with Connectivity Preservation and Collision Avoidance. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 71525-71534.
- Das, A., Fierro, R., Kumar, V., Ostrowski, J., Spletzer, J. and Taylor, C.A., (2002). Vision-Based Formation Control Framework, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 813-825.
- Demirten, M., <https://demirten.gitbooks.io/linux-sistem-programlama/content/sockets/tcp.html>
- Deng, J., Li, K., Wu, S. and Wen, Y., (2020). Distributed Adaptive Time-Varying Formation Tracking Control for General Linear Multi-Agent Systems Based on Event-Triggered Strategy. *IEEE Access*, 8, pp. 13204-13217.
- Dierks, T. and Jagannathan, S., (2009). Neural Network Control of Quadrotor UAV Formations. *2009 American Control Conference*, USA, pp. 2990-2996.
- Dong, X., Zhou, Y., Ren, Z. and Zhong, Y., (2015). Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies. *Control Engineering Practise*, 46(2016), p. 26-36.
- Dong, X., Zhou, Y., Ren, Z. and Zhong, Y., (2017). Time-Varying Formation Tracking for Second-Order Multi-Agent Systems Subjected to Switching Topologies with Application to Quadrotor Formation Flying. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 5014-5024.
- Du, H., Zhu, W., Wen, G., Duan, Z. and Lü, J., (2019). Distributed Formation Control of Multiple Quadrotor Aircraft Based on Nonsmooth Consensus Algorithms. *IEEE Transaction on Cybernetics*, vol. 49, no. 1, pp. 342-353.
- Eski, G. Ş., (2013). Normalleştirilmiş Laplacian ile İşaretsiz Laplacian Matrislerin Özdeğerleri için Sınırlar. *Yükseklisans Tezi*. Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 36 sayfa.
- Fall, K.R. and Stevens, W.R., 2012. TCP/IP Illustrated, Volume1, 2nd ed., Addison-Wesley.
- Fried, M.D., and Jarden, M. (2023). The Haar Measure. In: Field Arithmetic. Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete. 3. Folge / A Series of Modern Surveys in Mathematics, vol 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28020-7_21
- Garcia, R.A., Rubio, F.R. and Ortega, M.G., (2012). Robust PID Control of the Quadrotor Helicopter. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 3, pp. 229-234.
- Ge, X. and Han, Q.L., (2017). Distributed Formation Control of Networked Multi-Agent Systems Using a Dynamic Event-Triggered Communication Mechanism, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 8118-8127.

- Gonzalez-Sierra, J., Rios, H. and Dzul, A., (2020). Quadrotor-Rotor Robust Time-Varying Formation Control: A Continuous Sliding Mode Control Approach. *International Journal of Control*, 93(7), pp. 1659-1676.
- Guo, S. and Meng, X., (2023). Fully Distributed Control of Multiagent Networks with Edge-Based Event-Triggered Communication. *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 68, no. 9, pp. 5630-5637.
- Guzey, H.M., Dierks, T., Jagannathan, S. and Acar, L., (2019). Modified Consensus-based Output Feedback Control of Quadrotor UAV Formations Using Neural Networks, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 94, No. 1, pp. 283-300.
- He, L. and Dong, W., (2022). Distributed adaptive consensus tracking control for heterogeneous nonlinear multi-agent systems. *ISA Transaction*, 130(2022), pp. 177-183.
- He, M., Mu, J. and Mu, X., (2020). H_∞ leader-following consensus of nonlinear multi-agent systems under semi-Markovian switching topologies with partially unknown transition rates. *Information Sciences*, 513, pp. 168-179.
- Helton, J.W. and James, M.R., (1999). Extending H_∞ Control to Nonlinear Systems: Control of Nonlinear Systems to Achieve Performance Objectives. *Advances in Design and Control (siam)*, 320 pages.
- Jasim, W. and Gu, D., (2018). Robust Team Formation Control for Quadrotors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 1516-1523.
- Jin, P.F., Yu, J.Q., Jia, Z.Y. and Yang, D., (2019). Optimal Formation Control for Quadrotors with Collision Avoidance Based on Dynamic Constrains, *the 9th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1215 (2019) 012018)*, 1215, pp. 1-9.
- Jing, G., Zheng, Y., and Wang, L., (2017). Consensus of Multi-agent Systems with Distance-Dependent Communication Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 28, no. 11, pp. 2712-2726.
- Kocer, B.B., Tjahjowidodo, T. and Seet, G.G.L., (2018). Centralized Predictive Ceiling Interaction Control of Quadrotor VTOL UAV. *Aerospace Science and Technology*, 76, pp. 455-465.
- Köksal, N., Fidan, B. and Büyükkabasakal, K., (2015). Real-time Implementation of Decentralized Adaptive Formation Control on Multi-Quadrotor Systems. *2015 European Control Conference (ECC)*, Austria, pp. 3162-3167.
- Kolaric, P., Chen, C., Dalal, A. and Lewis, F.L., (2018). Consensus controller for multi-UAV navigation. *Control Theory and Technology*, 16, pp. 110-121.
- Lee, G. and Chong, N.Y., (2009). Decentralized formation control for small-scale robot teams with anonymity. *Mechatronics*, vol. 19, no. 1, pp. 85-105.
- Lee, M.H., Nguyen, N.P. and Moon, J., (2019). Leader-follower Decentralized Optimal Control for a Large Population Hexarotors with Tilted Propellers: A Stackelberg Game Approach. *Journal of Franklin Institute*, vol. 356, no. 12, pp. 6175-6207.
- Li, S., Wang, Y. and Tan, J., (2017). Adaptive and Robust Control of Quadrotor Aircrafts with Input Saturation. *Nonlinear Dynamics*, 89, pp. 255-265.
- Li, X., Dong, X., Li, Q. and Ren, Z., (2019). Event-triggered time-varying formation control for general linear multi-agent systems. *J. of Franklin Institute*, vol. 356, no. 17, pp. 10179-10195.

- Li, Z. and Duan, Z., (2014). Cooperative control of multi-agent systems: A consensus region approach. *CRC Press*, 2014.
- Liao, T.L., Chan, W.S. and Yan, J.J., (2018). Distributed Adaptive Dynamic Surface Formation Control for Uncertain Multiple Quadrotor Systems with Interval Type-2 Fuzzy Neural Networks. *Transaction of the Institute of Measurement and Control*, vol. 41, no. 7, pp. 1861-1879.
- Liu, C., Pan, J. and Chang, Y., (2016). PID and LQR Trajectory Tracking Control for an Unmanned Quadrotor Helicopter: Experimental Studies. *in the Proceedings of the 35th Chinese Conference, China*, pp. 10845-10850.
- Liu, H., Ma, T., Lewis, F.L. and Wan, Y., (2018). Robust Formation Control for Multiple Quadrotors with Nonlinearities and Disturbances. *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1362-1371.
- Lizzio, F.F., Capello, E. and Guglieri, G., (2022). Implementation and Performance Evaluation of a Consensus Protocol for Multi-UAV Formation with Communication Delay. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dubrovnik, Croatia*, pp. 1592-1600.
- Lv, Y., Li, Z., Duan, Z. and Feng, G., (2017). Novel distributed robust adaptive consensus protocols for linear multi-agent systems with directed graphs and external disturbances. *Int. J. of Control*, vol. 90, no. 2, pp. 137-147.
- Mahmood, A. and Kim, Y. (2015). Leader-Following Formation Control of Quadcopters with Heading Synchronization. *Aerospace Science and Technology*, 47(2015), pp. 68-74.
- Mazhar, N., Malik, F.M., Khan, R., Raza, A., Mazhar, S. and Irfan, M., (2020). Robust Decentralized Nonlinear Formation Control of Multi-agent Quadrotor. *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Antalya, Turkey.
- Milburn, T., (2018). Analysis of Advanced Control Methods for Quadrotor Trajectory Tracking. MSc, Electrical and Computer Engineering, The Ohio State University, 70 pages.
- Nguyen, N.P. and Hong, S.K., (2019). Fault-Tolerant Control of Quadcopter UAVs using Robust Adaptive Sliding Mode Approach. *Energies*, vol. 12, no. 95, pp. 1-15.
- Notarstefano, G., Egerstedt, M. and Haque, M., (2011). Containment in Leader-Follower networks with Switching Communication Topologies. *Automatica*, 47(2011), pp. 1035-1040.
- Olfati-Saber, R., Fax, A. and Murray, R.-M., (2007). Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *in Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215-233.
- Orman, K., (2018). Adaptif Bulanık Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrol Yapısının İnsansız Araçların Denetimine Uygulanması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pal, A. and Naskar, K., (2021). Cooperative Control with Higher Order Consensus for Geometric Configuration of Multiple UAVs Flying in Formation. *in Proc. Int. Sym. Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA)*, Goa, India, pp. 187-191.
- Qian, D. and Xi, Y., (2018). Leader-Follower Formation Maneuvers for Multi-Robot Systems via Derivative and Integral Terminal Sliding Mode. *Applied Sciences*, vol. 8, no. 1045, 16 pages.

- Qianying Li., (2014). Grey-Box System Identification of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *Msc Thesis*, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology.
- Raffo, G.V., Ortega, M.G. and Rubio, F.R., (2011). Nonlinear H_∞ Controller for the Quadrotor Helicopter with Input Coupling. *Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano*, pp. 13834-13839
- Rafifandi, R., Asri, D. L., Ekawati, E. and Budi, E. M., (2019). Leader-Follower Formation Control of two Quadrotor UAVs, Springer SN Applied Sciences, vol. 1, No. 539,12 pages.
- Rekabi, F., Shirazi, F.A. and Sadighi M. J., (2020). Distributed nonlinear H_∞ control algorithm for multi-agent quadrotor Formation flying. *ISA Transactions*, 96(2020), pp. 81-94.
- Ren, W. and Beard, R. W., (2008). Distributed consensus in Multi-Vehicle Cooperative Control; Theory and Applications. *Springer*, 317 pages.
- Restrepo, E., Loria, A., Sarras, I. and Marzat, J., (2023). Robust Consensus of High-Order Systems Under Output Constraints: Application to Rendezvous of Underactuated UAVs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68, no. 1, pp. 329-342.
- Rhodes, B. and Goerzen, J., (2010). Foundations of Python Network Programming, 2nd ed., Apress.
- Rice, C., Gu, Y., Chao, H., Larrabee, T., *et al.*, (2016). Autonomous Close Formation Flight Control with Fixed Wing and Quadrotor Test Beds. *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2016, pp. 1-15.
- Rinaldi, F., Chiesa, S. and Quaglotti, F., (2013). Linear Quadratic Control for Quadrotors UAVs Dynamics and Formation Flight. *J Intell Robot Syst.*, 70, pp. 203-220.
- Rui, W. and Jinkun, L., (2017). Adaptive formation control of quadrotor unmanned aerial Vehicles with Bounded Control Thrust. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, no. 2, pp. 807-817.
- Sumantri, B., Uchiyama, N. and Sano, Shigenori., (2016). Least square based sliding mode control for a quad-rotor helicopter and energy saving by chattering reduction, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66-67, pp. 769-784.
- Tayebi A. and McGilvray S., (2006). Attitude stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, 562-571.
- Thien, R. T.Y. and Kim, Y., (2018). Decentralized Formation Flight via PID and Integral Sliding Mode Control. *Aerospace and Technology*, vol. 81(2018), pp. 322-332.
- Toksöz, M.A., Oğuz, S. and Gazi, V., (2019). Decentralized Formation Control of a Swarm of Quadrotor Helicopters. *in the Proceedings of the 15th IEEE Conference on Control and Automation*, Scotland, pp. 1006-1013.
- Trejo, J. A.V., Adam-Medina, M., Garcia-Beltran, C.D., Ramirez, G.V. G., Zapata, B.Y.L., Sanchez-Coronado, E.M. and Theilliol, D., (2021). Robust Formation Control Based on Leader-Following Consensus in Multi-Agent Systems with Faults in the information Exchange: Application in a Fleet of Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 104940-104949.
- Uygur, A. F., (2010). Süspansiyon Sistemlerinin Dışbükey Optimizasyon Tabanlı " L_2 " Kontrolü. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Programı, 127 sayfa.

- Wang, C., Zuo, Z., Wang, J. and Ding, Z., (2021). Robust Cooperative Control of Multi-Agent Systems; A Prediction and Observation Perspective. *CRC Press (Taylor & Francis)*, 231 pages.
- Wang, D., Zhang, N., Wang, J. and Wang, W., (2017). A PD-Like Protocol with a Time Delay to Average Consensus Control for Multi-Agent Systems under an Arbitrarily Fast Switching Topology. *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. 47, no. 4, pp. 898-907.
- Wang, S. and Meng, X., (2021). Adaptive Consensus and Parameter Estimation of Multiagent Systems with an Uncertain Leader. *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 66, no. 9, pp. 4393 - 4400.
- Wu, F., Chen, J. and Liang, Y., 2017. Leader-Follower Formation Control for Quadrotors, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 187 (2017), pp. 1-8.
- Xiao, W., Cao, L., Li, H. and Lu, R., (2020). Observer-based adaptive consensus control for nonlinear multi-agent systems with time-delay. *Science China Information Sciences*, 63(132202:2), 17 pages.
- Xu, R. and Özgüner, Ü., (2006). Sliding Mode Control of a Quadrotor Helicopter. *In the Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*, USA, pp. 4957-4962.
- Xu, W. and Daniel, W.C.H., (2016). Clustered Event-Triggered Consensus Analysis: An Impulsive Framework. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 11, pp. 7133-7143.
- Xuan-Mung, N. and Hong, S.K., (2019). Robust Adaptive Formation Control of Quadrotors Based-On a Leader-Follower Approach,” *Advanced Control for Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, no. 4, 11 pages.
- Yan, D., Zhang, W. and Chen, H., (2019). Research on Consensus Formation Based on Double Closed-Loop Sliding Mode Control, *Chinese Control Conference (CCC)*, Guangzhou, China. pp. 5550-5556.
- Yan, J., Guan, X.-P., Luo, X.-Y. and Yang, X., (2012). Consensus and Trajectory Planning with Input Constraints for Multi-Agent Systems. *Acta Automatica Sinica*, vol. 38, no. 7, pp. 1074-1082.
- Yang, D., Ren, W., Liu, X. and Chen, W., (2016). Decentralized Event-Triggered Consensus for linear Multi-Agent Systems under General Directed Graphs. *Automatica*, 69(2016), pp. 242-249.
- Yang, J., Cai, Z., Lin, Q. and Wang, Y., (2013). Self-tuning PID control design for Quadrotor UAV based on Adaptive Pole Placement Control. *2013 Chinese Automation Congress, China*, pp. 233-237.
- Yu, B., Dong, X., Shi, Z. and Zhong, Y., (2013). Formation Control for Quadrotor Swarm Systems: Algorithms and Experiments, *Proceedings of the 32nd Chinese Conference, China*, pp. 7099-7104.
- Yu, L., Liu, Y., Lini D. and Han, Q., (2019). Adaptive sliding mode control for multi-UAV systems with parametric uncertainties, *IOP, Conf. Series, Materials Science and Engineering*, 569, pp. 1-7.
- Zhang, H., Li, Y. and Xu, G., (2018). Consensus-Based control for unmanned aerial vehicle formation with speed adaptability. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Shenyang, China*. pp. 6106-6111.
- Zhang, Y. and Li, S., (2017). Distributed Biased Min-Consensus with Applications to Shortest Path Planning. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 10, pp. 5429-

5436.

- Zhao, Z. Wang, J., Chen, Y. and Ju, S., (2020). Iterative learning-based formation control for multiple quadrotor unmanned aerial vehicles. *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(2), pp. 1-12.
- Zhou, P. and Chen, B.M., (2022). Semi-global leader-following consensus-based formation flight of unmanned aerial vehicles. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(1), pp. 31-43.
- Zhou, Z., Wang, H., Wang, Y., Xue, X. and Zhang, M., (2019). Distributed formation control for multiple quadrotor UAVs under Markovian switching topologies with partially unknown transition rates. *Journal of Frank. Inst.*, vol. 356, no. 11, pp. 5706-5728.
- Zulu, A. and John, S., (2014). A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors. *Open Journal of Applied Sciences*, 4, pp. 547-556.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
Adı Soyadı: Kaan Can
Doğum tarihi:
Doğum Yeri:
Uyruğu:
Adres:
E-mail:
Eğitim
Lise:
Lisans:
Yüksek lisans:
Doktora:
Yabancı Dil Bilgisi
İngilizce:
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar
Tezden Üretilmiş Yayınlar
Makaleler
1.
2.